NATIONAL
ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE
S. I. SUBBOTIN INSTITUTE OF GEOPHYSICS

V. N. SHUMAN

SELECTED WORKS

KIEV 2017

Чудесно обойдя круг бытия,
вернулся снова на круги своя
и жажду утолять не как придется,
но лишь водой из чистого колодца.

И. В. Кормильцев

НАЦИОНАЛЬНАЯ
АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ГЕОФИЗИКИ ИМ. С. И. СУББОТИНА

В. Н. ШУМАН

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

КИЕВ 2017

УДК 550.3

В сборник избранных трудов В. Н. Шумана вошли статьи, опубликованные в «Геофизическом журнале» в период с 2010 по 2016 гг. В этих статьях отражены основные результаты его научных изысканий в области теории электромагнитных зондирующих систем и импедансных измерений в методах геоэлектромагнетизма. Большое внимание уделено вопросам электродинамики геосреды — активной (возбуждающей) диссипативной системы, фундаментальным свойством которой является физическая, геометрическая и структурная нелинейность. Проанализированы проблеми генерации, пространственной дифференциации и особенностей распространения акустосейсмоэлектромагнитного шума литосферного происхождения с учетом концепции динамически неустойчивой геосреды.

Для специалистов в области электромагнитных исследований Земли.

В збірник вибраних творів В.М. Шумана увійшли статті, які були опубліковані в «Геофизическом журнале» за період з 2010 по 2016 рр. В цих статтях відображені основні результати його наукових досліджень у галузі теорії електромагнітних зондуючих систем та імпедансних вимірювань в методах геоелектромагнетизму. Значна увага приділена питанням електродинаміки геосередовища — активної (збуджуючої) дисипативної системи, фундаментальною властивістю якої є фізична, геометрична і структурна нелінійність. Проаналізовані проблеми генерації, просторової диференціації і особливостей розповсюдження акустосейсмоелектромагнітного шуму літосферного походження з урахуванням концепції динамічно неврівноваженого геосередовища.

Для спеціалістів у галузі електромагнітних досліджень Землі.

The book of the selected works of V. N. Schuman includes papers published in the «Geophysical Journal» from 2010 to 2016 years. They reflect the main results of his scientific research on the theory of electromagnetic sounding systems and impedance measurements in the methods of geoelectromagnetism. Much attention is paid to the problems of the electrodynamics of the geo-environment — the active (exciting) dissipative system whose fundamental roperty is physical, eometric and structural nonlinearity. The problems have been analyzed of generation, spatial differentiation and features of the propagation of acoustic electro-magnetic noise of the lithospheric origin taking into account the concept of dynamically unstable geo-environment.

For specialists in the electromagnetic studies of the Earth.

Ответственный редактор —

д-р физ.-мат. наук, профессор,
академик НАН Украины *В. И. Старостенко*

Утверждено к печати ученым советом
Института геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины

Издание осуществлено
при поддержке ООО «Юг-нефтегазгеология»

© В. Н. Шуман, 2017

ОТ ОТВЕТСТВЕННОГО РЕДАКТОРА

Издание избранных трудов Владимира Николаевича Шумана (18.02.1942—05.11.2016), известного ученого в области электромагнитных исследований Земли, доктора физико-математических наук, заведующего отделом математической геофизики Института геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, лауреата Государственной премии Украины и премии им. С. И. Субботина НАН Украины, приурочено к Третьей Международной конференции «Актуальные проблемы геосреды и зондирующих систем» (3—5 октября 2017 г., Киев, Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины). Владимир Николаевич был инициатором и активно участвовал в организации двух предыдущих конференций, тематика которых тесно связана с основными направлениями его научной работы. Третья конференция — это дань памяти Владимиру Николаевичу и его близкому другу и соратнику по геоэлектрическим исследованиям на протяжении всей их трудовой деятельности в Институте геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, доктору геологических наук Сергею Николаевичу Кулику. Поэтому сборник открывается их совместной статьей, опубликованной в 2002 г. в журнале «Acta Geophysica Polonica» на английском языке.

В книгу вошли статьи Владимира Николаевича, которые были опубликованы в «Геофизическом журнале» за период с 2010 по 2016 гг. и отражают основные результаты его научной деятельности в последние годы. Следует отметить, что в своих теоретических изысканиях он широко использовал самые современные достижения физических наук, о чем свидетельствуют его неоднократные обращения к журналу «Успехи физических наук».

Уникальное космическое явление 1 августа 2008 г.

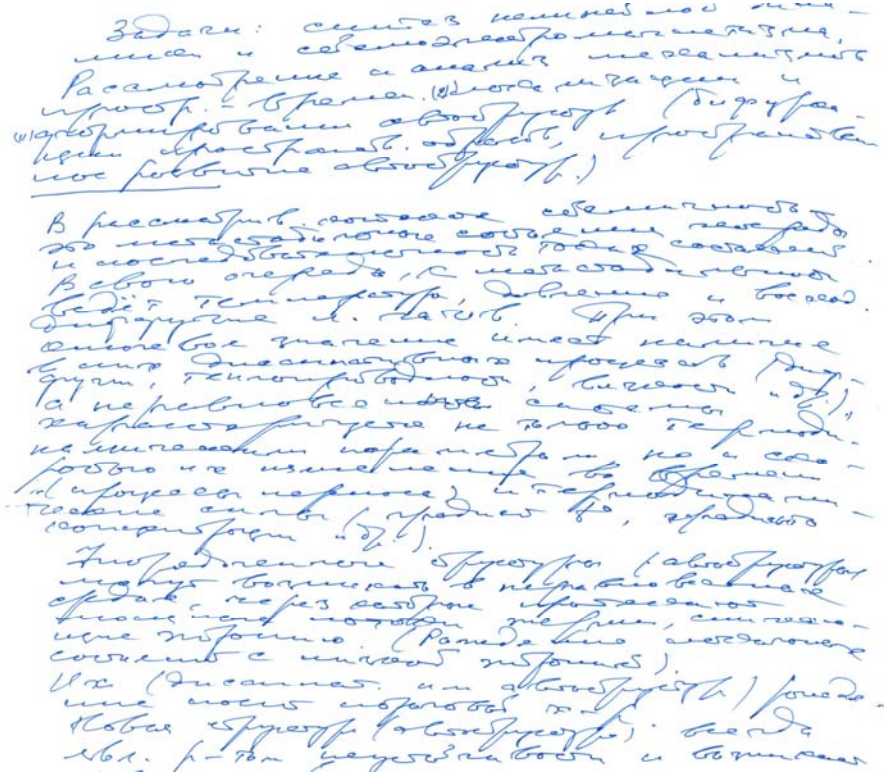
Научные интересы Владимира Николаевича были сосредоточены на общей теории электромагнитных зондирующих систем и импедансных измерений в методах геоэлектромагнетизма, интегральной кинематике электромагнитных возмущений и скоростных параметрах георадарных электромагнитных систем. Большое внимание он уделял особенностям электродинамического описания геосреды как открытой нелинейной диссипативной системы в связи с многофакторностью воздействия на нее физических полей внешнего происхождения.

В 2011 г. вышла в свет в соавторстве с М. Г. Савиным монография «Математические модели геоэлектрики», в которой Владимиром Николаевичем были рассмотрены актуальные вопросы теории и практики современной геоэлектрики, в частности решения прямых и обратных задач электродинамики неоднородных анизотропных сред, а также современные методы ее исследования. Предисловие к указанной монографии написал академик РАН В.Н. Страхов. В частности, характеризуя книгу, он подчеркнул, что ее «особая ценность заключается в том, что авторы не ограничиваются рассмотрением лишь отдельных частных вопросов, а излагают именно такие результаты собственных многолетних исследований от развития классических постановок прямых и обратных задач электродинамики анизотропных сред до концепции глобальной электрической цепи, которые могут служить теоретической базой для создания новых методов геоэлектрики».

В последние годы Владимиром Николаевичем были проанализированы вопросы генерации акустосейсмоэлектромагнитного шума литосферного происхождения, его пространственной дифференциации и особенностей распространения с учетом концепции динамически неустойчивой геосреды. Его внимание было сосредоточено на вопросах электродинамики активных сред, на необходимости изменения парадигмального подхода к изучению электродинамики геосреды — активной (возбуждающей) диссипативной системы, фундаментальным свойством которой является физическая, геометрическая и структурная нелинейность. Им были рассмотрены возможности использования сейсмоэлектромагнитного шума литосферы с целью определения ее структуры и описания происходящих в ней геодинамических процессов.

Необычайно трудоспособный и талантливый, целеустремленный и принципиальный, с широким кругозором и эрудицией, сильным характером и рациональным оптимизмом Владимир Николаевич обладал невероятным научным чутьем и предвидением ожидаемых результатов. В своей последней статье «О прогнозируемости активных геосистем: метастабильность и ус-

тойчивые переходы вместо аттракторов» он подытожил рассмотрение проблемы прогноза и прогнозируемости сейсмической активности с учетом современных позиций и достижений нелинейной динамики сложных систем, в частности неравновесных сред, для процессов структурообразования. При этом он подчеркнул другой весьма важный аспект проблемы, на который не обращалось должного внимания — влияние шумов и флуктуаций различной природы на режимы функционирования распределенных нелинейных динамических систем.



За шаг до 75-летия:
недописанная статья В. Н. Шумана. Начало…

Уверен, что книга «Избранные труды» Владимира Николаевича Шумана найдет заинтересованного читателя и будет по-

лезна геологам и геофизикам, которые занимаются вопросами геоэлектромагнетизма, а также всем тем, кто изучает Землю геофизическими методами.

Владимир Николаевич был светлым, умным, обаятельным, простым в общении человеком. О его многогранности, научном провиденьи, общительности и открытости свидетельствуют и публикации [Rokityansky, 2016; Владимир…, 2016; Рокитянский, 2017]. Авторы этих публикаций знали и тесно сотрудничали с В. Н. Шуманом на протяжении многих лет. И. И. Рокитянский был научным руководителем Владимира Николаевича по аспирантуре, совместно с ним опубликовал несколько известных работ. В монографии [Rokityansky, 1982], которая давно относится к числу классических, он выразил благодарность В.Н. Шуману за полезные замечания, высказанные при знакомстве с рукописью книги. С. Н. Кулик также был аспирантом И. И. Рокитянского. Т. К. Бурахович, автор некролога [Владимир…, 2016], была коллегой и ученицей В. Н. Шумана по научному направлению.

В. Н. Шуман много и очень активно работал. Всегда спокойный, а часто ироничный, он любил повторять: «Пора отмечать успехи!». Эта известная его фраза всегда заставляла всех улыбнуться и всех расслабляла, общаться с Владимиром Николаевичем было легко и приятно.

С Владимиром Николаевичем мы многие годы вместе возглавляли редакционную коллегию «Геофизического журнала». Я представлял к печати его статьи. Все, что писал Владимир Николаевич, было высокопрофессионально, а на мои замечания он реагировал мгновенно и по существу. Работать с ним было приятно и познавательно.

Эта книга — достойный вклад в увековечивание памяти крупного ученого-геофизика и прекрасного человека Владимира Николаевича Шумана. Она облегчит доступ специалистов к результатам его исследований и сформулированным идеям.

Выражаю глубокую благодарность директору ООО «Югнефтегазгеология» Н. П. Лойко, оказавшему спонсорскую поддержку при издании этой книги, а также Т. К. Бурахович и

В. П. Коболеву, которые выполнили большой объем работы при подготовке книги к печати.

В. И. Старостенко

Список литературы

Владимир Николаевич Шуман (18.02.1942—05.11.2016). *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 6. С. 202—203.

Рокитянский И. И. В. Н. Шуман — ученый, гражданин, патриот (к 75-летию со дня рождения). *Геофиз. журн.* 2017. Т. 39. № 1. С. 144—146.

Rokityansky I. I., 1982. Geoelectromagnetic investigation of the Earth's crust and mantle. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 381 p.

Rokityansky I. I., 2016. Vladimir «Volodya» Nikolaevich Shuman (1942—2016). *International Association of Geomagnetism and Aeronomy News* (53), 15—16.

The fundamental relations of impedance type in general theories of the electromagnetic induction studies

Vladimir Shuman,
Sergey Kulik

Acta Geophys. Polon. —
2002. V. 50. — № 4. — P. 607—618.

1. Introduction. The relevance of mathematical models describing real physical phenomena has always been important. In particular, though a great progress has been achieved over the last few years in research of magnetic, ionospheric electrodynamics links [Lyatsky, Maltsev, 1983], it is still felt that concepts of the sources and nature of magnetotelluric (MT) variations are limited and incomplete. No research has been conducted on electrodynamics of variations fields in the air which results in contradiction of views on the role of longitudinal magnetic-ionospheric currents in the formation of bi-modal structure of the variation field [Berdichevsky et al., 1971; Berdichevsky, Zhdanov, 1981; Chetaev, 1985; Aksenov, 1989; Berdichevsky, Dmitriev, 1991; Vanyan, Budkovskaya, 1998; Aksenov, 1997; Vanyan, 1997].

It seems that the presence of virtually non-conductive atmosphere, which almost completely insulates the Earth from ionosphere (according to estimates [Berdichevsky, Dmitriev, 1991] the leakage current from the ionosphere to the Earth does not exceed one millionth part) allows us to believe that telluric

Vladimir Shuman and Sergey Kulik.

currents are of inductive origin (the H mode), and the galvanic mechanism (the E mode) does not play an essential part in the frequency range under consideration, and can be excluded from consideration. It has been found however [Aksenov, 1997], that the situation is far from being that unique; in global variations both H and E modes are excited by the same tangent current components j_θ and j_φ, which flow through the spherical ionosphere. Therefore currents through the atmosphere are indeed so small that its contribution to the excitation of variations of E and H field is not tangible. In other words the same current components j_θ and j_φ flowing in the spherical ionosphere, generate a bi-modal electromagnetic field in the air [Aksenov, 1989, 1997].

Hence there are fundamental differences in electrodynamics of global variation fields in horizontally-stratified and spherically-symmetrical models of Earth and ionosphere. As results, there are new aspects in the problem of taking into account E models in geoelectromagnetic research.

2. The Surface or input Impedance in an Arbitrary Field Generated by an External Source. Contrary to established traditions, let us start from general definitions. Using the normal tangential form of electrodynamics equation and taking into consideration the conjugate conditions at the boundary between two media for normal

components of the field and for normal derivatives, the following can be written [Kravchenko, Nizhnik, 1977]

$$\left.\frac{\partial H_n}{\partial n}\right/ B_n = \frac{i\omega\nabla\mathbf{H}_\tau}{\nabla_\tau(\mathbf{E}_\tau\mathbf{n})} = \frac{i\omega}{z_1},$$
$$\left.\frac{\partial H_n}{\partial n}\right/ \sigma' E_n = \frac{\nabla_\varsigma \mathbf{E}_\tau}{\nabla_\tau(\mathbf{H}_\tau\mathbf{n})} = z_2, \qquad (1)$$

where z_1 and z_2 are scalar parameters; $\mathbf{E}=\mathbf{E}_\tau+\mathbf{n}E_n$, $\mathbf{H}=\mathbf{H}_\tau+\mathbf{n}H_n$; $\nabla=\nabla_\tau+\nabla_n$ is Hamilton operator and its components. $\nabla_\tau\mathbf{A}=\mathrm{div}_\tau\mathbf{A}_\tau$, $\nabla_n\mathbf{A}=\mathbf{n}\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial n}$, $\nabla_\tau\varphi=\mathrm{grad}_\tau\varphi$, $\sigma'=\sigma-i\omega\varepsilon$ is complex conductivity, the real part is determined by conductivity currents σE, and the imaginary part is determined by displacements currents $i\omega\varepsilon E$; σ and ε are conductivity and dielectric permittivity of the medium; $\mathbf{n}$ is an external normal to the boundary.

The time dependence is $e^{-i\omega t}$. The ratios (1) are most general definition of the two scalar parameters of the impedances z_1 and z_2, which dependent on the electromagnetic disturbance propagating in the medium.

Thus following [Lipskaya, 1978], it is possible to claim that, in the general case, an interaction between a field and a medium is manifested through derivatives of the field components. An important feature of the equations (1) is their local character, because in order to determine the scalar parameters z_1 and z_2 it is required to specify the field in the vicinity of the observation point at the boundary between media.

A more detailed study of properties of scalar parameters z_1 and z_2 is possible for specific models of the external field [Kravchenko, Nizhnik, 1977, Shuman, 1993].

In particular, when a spatial-periodic in tangential direction τ field is specified, and is characterized by a spatial frequency vector λ (λ is a real vector), the scalar parameters z_1 and z_2 can by combined into a single affinor of impedance

$$\hat{Z} = z_1 P_\perp + z_2 P_\parallel, \qquad (2)$$

where $P_{\|} = \frac{\lambda \cdot \lambda}{\lambda^2}$, $P_{\perp} = \frac{(\lambda \mathbf{n}) \cdot (\lambda \mathbf{n})}{\lambda^2}$ and $\lambda \cdot \lambda$ and $(\lambda \mathbf{n}) \cdot (\lambda \mathbf{n})$ are the affinor products of the vectors. Application of the affinors $P_{\|}$ and $P_{\perp}$ with respect to the vector consists in its expansion of two orthogonal components in the direction of the vector λ and $\lambda \mathbf{n}$. With reference to adopted symbols, the following can be written:

$$\mathbf{E}_{\tau} = \hat{Z}\left(\mathbf{H}_{\tau} \mathbf{n}\right). \tag{3}$$

The examples allow a simple generalization if $\lambda = \lambda' + i\lambda''$ is complex vector [Chetaev, 1985; Aplakov, Chantladze, 1984]. Using the natural generalization of the azimuth concept over complex vectors, the expansion of the observed field components its fields of partial waves is reduced to a complex projection, i.e. identifying the «longitudinal» and «transverse» field components relative to a comprehensive direction of the horizontal propagation, determined by the horizontal component of the wave vector $\lambda = \lambda' + i\lambda''$. We remember that in this case the operation of scalar multiplication of complex vectors is defined in the same way as for real vectors. If

$$a = \sum a_k i_k \,,\; b = \sum b_k i_k \,, \tag{4}$$

where a_k and b_k are complex components, then

$$ab = \sum a_k b_k \,. \tag{5}$$

Similary the angle between two complex vectors **a** and **b** is determined by the formula

$$\cos\gamma = \frac{\mathrm{a} \cdot \mathrm{b}}{\sqrt{(\mathrm{a} \cdot \mathrm{a})(\mathrm{b} \cdot \mathrm{b})}}. \tag{6}$$

If the angle γ is complex, this means that the wave has elliptical polarization, which can be described by complex vectors.

We shall note that this definition of the scalar product differs from the conventional one for complex Euclidean spaces, where

$$ab = \sum a_k b_k^* \,. \tag{7}$$

The asterisk denotes complex conjugation. We will return to this definition later.

Thus the directional analysis of MT observations consists in identifying special directions of a given wave packet (a complex wave vector $\lambda=\lambda'+i\lambda''$) which is implemented by both partial TE and TM waves, comprehensive projection and calculation of the impedances of partial waves. The medium here is modeled by a horizontally-stratified half-space.

Now it would be natural to discuss one of the generalizations of this method, associated with an alternative formulation of the problem and an alternative selection of the orthogonal basis for complex vectors.

It is assumed that the tangential components $\mathbf{E}_\tau$ and $\mathbf{H}_\tau$ of harmonic electromagnetic field are specified at a certain closed surface (on the Earth surface in particular). As known [Aboul-Atta, Boerner, 1975], the local relationship between the tangential components of complex amplitudes of the electric and magnetic fields at this surface depends in general on the two scalar parameters determined as coordinate expansion of a dual vector product $\mathbf{n}\times\mathbf{E}_\tau\times\mathbf{n}$ over the orthogonal basis of the $\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau$ and $\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau^*\times\mathbf{n}$:

$$\mathbf{n}\times\mathbf{E}_\tau\times\mathbf{n}=\zeta\left(\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau\right)+\xi^*\left(\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau\times\mathbf{n}\right), \tag{8}$$

where

$$\zeta=-\frac{\mathbf{n}\left(\mathbf{E}_\tau\times\mathbf{H}_\tau^*\right)}{\left\|\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau\right\|^2},\ \xi^*=\frac{\left(\mathbf{n}\times\mathbf{E}_\tau\right)\left(\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau\right)}{\left\|\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau\right\|^2}, \tag{9}$$

$$\left\|\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau\right\|^2=\left(\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau\right)\left(\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau^*\right),$$

$\mathbf{n}$ is an external normal to the surface. The uniqueness of the expansion (8) follows from the linear impedance and orthogonality of the vectors $\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau$ and $\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau^*\times\mathbf{n}$. By definition (7)

$$\left(\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau\right)\left(\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau^*\times\mathbf{n}\right)=\left(\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau\right)\left(\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau\times\mathbf{n}\right)=\left(\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau\right)\left(\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau\right)n=0.$$

Selection of a normal basis in the standard form (7) appears to be more natural from the point of view of an energy interpretation of the scalar parameter ζ. The physical meaning of the coefficients ζ and ξ^* and a possibility to use them in processing of MT experiments, is discussed in [Shuman, 1993, 1998].

Having multiplied equation (8) term-by-term by **n** and having excluded $\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau^*$, a respective admittance equation is obtained:

$$\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau\times\mathbf{n}=-\frac{\zeta^*}{|\zeta|^2+|\xi|^2}\mathbf{n}\times\mathbf{E}_\tau+\frac{\xi^*}{|\zeta|^2+|\xi|^2}\mathbf{n}\times\mathbf{E}_\tau^*\times\mathbf{n}\,. \qquad (10)$$

Considering their importance in applications, let us supplement the equations (8) and (10) by exact formulas of an impedance type which link the normal and tangential field components at the closed surface under consideration without any assumptions as to the character of an external source and the medium's properties beneath this surface.

Expanding complex field vectors and the operator ∇ in the Maxwell equations into the tangential and normal components, the following can be written

$$i\omega\mu H_n=\nabla_\tau\left(\mathbf{E}_\tau\times\mathbf{n}\right), \qquad (11)$$

$$\sigma E_n=\nabla_\tau\left(\mathbf{H}_\tau\times\mathbf{n}\right), \qquad (12)$$

where, as above, $\nabla_\tau\mathbf{A}=\mathrm{div}_\tau\mathrm{A}_\tau$ is the surface divergence, defined within an arbitrary curved orthogonal system of co-ordinates (u, v, s) by means of ratio

$$\nabla_\tau\mathbf{A}=\frac{1}{h_u h_v}\left\{\frac{\partial}{\partial u}\left(h_v A_u\right)+\frac{\partial}{\partial v}\left(h_u A_{vu}\right)\right\}, \qquad (13)$$

h_u, h_v are the Lame factors. Using equation (8), equation (11) acquires, at the closed surface under consideration, the following form

$$i\omega\mu H_n=\nabla_\tau\left\{\left[\zeta\left(\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau\right)+\xi^*\left(\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau^*\times\mathbf{n}\right)\right]\times\mathbf{n}\right\}=$$

$$=\zeta\nabla_\tau\mathbf{H}_\tau+\mathbf{H}_\tau\nabla_\tau\zeta+\xi^*\nabla_\tau\left(\mathbf{H}_\tau\times\mathbf{n}\right)+\left(\mathbf{H}_\tau^*\times\mathbf{n}\right)\nabla_\tau\xi^*. \qquad (14)$$

Accordingly, considering the «admittance» equation (10), equation (12) can by presented in the following form:

$$\sigma E_n=\nabla_\tau\left\{\left[P\left(\mathbf{n}\times\mathbf{E}_\tau\right)+Q\left(\mathbf{n}\times\mathbf{E}_\tau^*\times\mathbf{n}\right)\right]\mathbf{n}\right\}=$$

$$=P\nabla_\tau\mathbf{E}_\tau+\mathbf{E}_\tau\nabla_\tau P+Q\nabla_\tau\left(\mathbf{E}_\tau^*\times\mathbf{n}\right)+\left(\mathbf{E}_\tau^*\times\mathbf{n}\right)\nabla_\tau Q\,, \qquad (15)$$

where $P = -\dfrac{\zeta^*}{|\zeta|^2 + |\xi|^2}$, $Q = -\dfrac{\xi^*}{|\zeta|^2 + |\xi|^2}$.

Remember that the effect of the component ∇ on the scalar field φ is determined by the equation:

$$\nabla_\tau \varphi = \mathrm{grad}_\tau \varphi = \frac{1}{h_u}\frac{\partial \varphi}{\partial u} 1_u + \frac{1}{h_v}\frac{\partial \varphi}{\partial v} 1_v . \qquad (16)$$

The boundary conditions of the impedance type (8), (14), (15) are exact and can be considered as generalizations of the well known approximate model by Rytov—Leontovich [Rytov, 1940, Leontovich, 1948]. They are of universal character, remaining valid in bi-modal medium excitation as well, when the presence of vertical components of the field is determined by not only inhomogeneities of the medium, but also by the structure of electromagnetic disturbances propagating along the boundary. These disturbances clearly display additional information which is not present in the Rytov—Leontovich model.

We should note that the equation (14) also generalizes known result [Kuckec et al., 1985], where the appearance of a vertical components H_n in the variation field was interpreted merely as an incidental field, scattered in the medium. There are no vertical components H_n and E_n in that field.

Thus we have considered here a number of sufficiently general and universal approaches to the definition of surface independence conditions, which both have common features and contact points, as well as essential differences. Despite the commonality of approaches, modern magnetotellurics has shifted just about everywhere to tensor concepts [Berdichevsky, Dmitriev, 1991]. By definition an impedance tensor $\hat{Z}$ is introduced as an operator that transfers a tangential vector $\mathbf{H}_\tau$ of the magnetic field at a point where the field is registered at the «earth-air» boundary, into a tangential vector of the electric fields $\mathbf{E}_\tau$:

$$\mathbf{E}_\tau = \hat{Z}\mathbf{H}_\tau , \qquad (17)$$

where $\hat{Z} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{ee} \end{pmatrix}$.

Nevertheless, however significant the result obtained by modern magnetotellurics in terms of the tensor approach are, there are pressing reasons of a physical and mathematical nature, which impose natural limits in regard to the applicability of this approximation. And simplicity of such a description is due to far-reaching idealization that not always matches reality. The most essential of them are perhaps the following:

– an incomplete and simplified character of concepts on electrodynamics of variation fields in the air;

– disregard for the complex character on an incident field's spectrum;

– independence of the impedance tensor components of the type of a propagating electromagnetic perturbation. Such independence is required to justify statistical methods in determining these components;

– a wealth of experience in practical determinations of the $Z_{ij}(\omega)$ values corresponding to the above model has shown that the accuracy obtained is much below the accuracy in measuring field variations proper and does not always suit the geophysic requirements for subsequent interpretation of MT data [Svetov, Shimelevich, 1988].

It should be also noted that MT and ET fields are actually named the induction and galvanic modes respectively, in reference to the method of their excitation. Many authors believe that the ET field is excited galvanically, namely by a current through the atmosphere. This is wrong. Electrodynamics of the spherical sources differs from the usual electrodynamics, because there, alongside with an induction there are two such excitations as — dynamo, when the magnetic field is created by magnetic field, and by the generation of toroidal fields by spherical components of a current. Both MT and ET modes are excited by the same current components j_0^{st} and j_u^{st}, which flow over the spherical ionosphere or induced in the spherical layers of the earth. The appearance of the ET mode of the field of variation in the air, has no effect on the vertical current through the atmosphere, as the magnetic components of the ET mode are toroidal. Rotor of a toroidal field generate a pol oidal field, that is potential in the air:

$$\mathrm{rot}\mathbf{H}_T = \mathbf{H}_P\,,\ \mathrm{rot}\mathbf{H}_P = \frac{\gamma}{\eta}\mathbf{H}_\tau\,,\ \eta = \frac{1}{\mu\sigma}\,,$$

γ — velocity of diffusion. This does not lead to the appearance of an additional vertical current through the atmosphere [Aksenov, 2001]. A bi-modal structure of global variations requires the verification of certain notions of the modern theory of geoelectromagnetism.

3. The Surface Impedance Gradient in the approximate Model by Rytov—Leontovich.

As has already been mentioned, the boundary conditions (8), (10), (14), (15) for harmonic fields at a closed surface are exact and, in their entirety, can by considered as generalizations of the now classical results by Rytov—Leontovich on the theory of the skin effect in bodies with highly complex dielectric permittivity. These results were obtained prior to the appearance of Tikhonov—Caniard models.

In the following, we should use different «interpretations» of Eqs. (8), (14), assuming that some quantities are known from an experiment and the others have to be calculated. It's easy to see, that these equations generalize and unify in a self sufficient way known classical methods (and their modifications) of local geoelectrical measurements — magnetotelluric sounding (MTS), magnetovariation sounding using spatial derivatives of the magnetic field (HSG) and deep geomagnetic sounding (GDS). The problems with realizations the above approach in practice are clear. For instance, to calculate both components of the complex vectors $\nabla_\tau\zeta$ and $\nabla_\tau\xi$ also magnitudes of scalar impedances ζ and ξ^*, using Eqs. (14), one has to conduct 6 independent measurements of variation of components of the magnetic field at the observation point and its vicinity at different polarization $\mathbf{H}_\tau$.

It seems promising to decrease the number of unknowns in the equation (12). One can do it by measuring tangential component of the electric field $\mathbf{E}_\tau$, determining scalar impedances ζ and ξ^* in accordance to equation (9) and determining only the components of complex vectors $\nabla_\tau\zeta$ and $\nabla_\tau\xi$ from equation (14). It is plausible that this way of solving the problem is the easiest to be carried out. Evaluation of these parameters is very useful and of much interest

today from the point view of diagnosis of section and setting the observations of the variation of the horizontal inhomogeneity of electric conductivity in the earth crust. Let us point to the existent attempts to realize this idea in a simplified way.

In particular the truncated version of formula (14) (without the third an fourth terms) where the conditions of application were indicated was obtained by Rytov in 1940 [Rytov, 1940]. Despite the clearly approximate character, simple, substantial and fine features of this formula provided a basis for numerous approximations in problems of electrodynamics, geo-electromagnetism and hydromagnetic dynamics [Svetov, Shimelevich, 1988]. Hence on the basis of this formula an attempt was made to take into account the effect of a horizontal inhomogeneity of the Earth crust on the measured input impedance [Gulelmi, 1987; Gulelmi, Gokhberg, 1987]. It is remarkable that a super-truncated version of this formula was used most often in geo-electrics:

$$i\omega\mu H_n \approx \mathbf{H}_\tau \nabla_\tau \zeta \,, \tag{18}$$

i. e. the second term of formula (14) was not taken into account. Here attempts are often made to use the formula specifically to obtain information on horizontal inhomogeneity of a section.

Another application for the truncated version of formula (14) is determining the gradient of the surface impedance $\nabla_\tau\ \zeta$ [Gulelmi, 1987; Gulelmi, Gokhberg, 1987]. Here the simplest solution of the problem involves just dropping the first term in formula (14) and retaining only the second one

$$i\omega\mu H_n \approx \zeta \mathbf{H}_\tau \nabla_\tau \,. \tag{19}$$

Ideally it would have been applicable to a transverse field, the structure of which is such that $\nabla_\tau \mathbf{H}_\tau = 0$. As known [Gulelmi, 1987] this condition is maintained approximately for longitudinal and transverse resonances of an earth-ionosphere endovibrator.

Presently however we do not have examples of actual application of the methodology under consideration. This is probably due to a far-fetched idealization laid down as its basis.

Also scepticism, expressed in [Rokitiansky, 1981] in regard to the method of derivatives, becomes understandable. It claims that this method «has no potential for research of the Earth electrical conductivity, and just mathematical refinement of the method provides incentives to its author to continue attempting its development and application».

4. Some of the features of measuring gradients of scalar impedance. It is known, that the vector of telluric field $\mathbf{E}_\tau$ is subject to the influence of subsurface inhomogeneities and polarizes according to the structure of the geoelectrical section. Taking into account the changing (in time) nature of the polarization of the geomagnetic field (main polarization axis of the geomagnetic field have daily variations), there are cases when complex vectors $\mathbf{E}_\tau$ and $\mathbf{H}_\tau$ are not perpendicular to each other anymore. Let us also note, that beside horizontal inhomogeneity of the distribution of the electroconductivity, the violation of the condition of the orthogonality of $\mathbf{E}_\tau$ and $\mathbf{H}_\tau$ can be caused by anisotropy and some other properties of the source. It is obvious, that a choice of individual variations (observation intervals), subject to the analysis with a purpose of defining quantities $\nabla_\tau\zeta$ and $\nabla_\tau\xi^*$, can prove to be non-trivial. Or at least, there is a need to find special directions on the horizontal plane. As such directions, we can choose directions of the field $\mathbf{H}_\tau$ polarization, which produce the biggest and the smallest absolute values of scalar parameters ζ and ξ^* and, according to Eqs. (14), the biggest and the smallest contribution to H_z.

5. The Concept of Impedance Tensor and Approximate Rytov—Leontovich Theory of Skin-effect. Now, let us consider some particular aspects of the problem. Let vectors $\mathbf{E}_\tau$ and $\mathbf{H}_\tau$ be orthogonal (conjugationally orthogonal). Then

$$E_x H_x + E_y H_y = 0\,.$$

In that case, scalar parameter ξ^* is equal to zero and from Eqs. (8) it follows that

$$\mathbf{E}_\tau = \zeta\left(\mathbf{n}\times\mathbf{H}_\tau\right) = \hat{Z}\mathbf{H}_\tau\,.$$

Therefore, the problem is reduced to the classical problem of

finding eigen values of impedance matrix $\hat{Z}$, which is reduced to solving equations:

$$Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y = \zeta H_y,$$
$$Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y = -\zeta H_x,$$

or, it can be rewritten as:

$$Z_{xx}H_x + \left(Z_{xy}H_y - \zeta\right)H_y = 0,$$
$$\left(Z_{xy} + \zeta\right)H_y + Z_{yy}H_x = 0. \qquad (20)$$

Requiring determinant of this system of equations be equal to zero, we get:

$$\zeta^2 - 2Z_1\zeta + \det\hat{Z} = 0$$

from which

$$\zeta_{1,2} = Z_1 \pm \sqrt{Z_1 - \det\hat{Z}},$$

where $\zeta_{1,2}$ are eigen values of matrix $\hat{Z}$ and $Z_1 = \frac{Z_{xy} - Z_{yx}}{2}$, $\det\hat{Z} = Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}$ are invariants independent from the direction of coordinate axis. Eigen fields correspond to the eigen values and the fields transform according to the law of 1-dimensional model: $\mathbf{E}_{1\tau} = \zeta_1\left[\mathbf{H}_{1\tau} \times \mathbf{n}\right]$; $\mathbf{E}_{2\tau} = \zeta_2\left[\mathbf{H}_{2\tau} \times \mathbf{n}\right]$.

These are complex, conjugationally-orthogonal vectors, whose main axes of polarization ellipses are mutually orthogonal. Main directions of tensor $\hat{Z}$ are connected with the orientation of polarization ellipses of fields of the matrix $\hat{Z}$.

The above example demonstrates a limited nature of the tensor approach as well as the limits of applicability of that method.

When $\xi^* \neq 0$, Eggers' orthogonalization method [Eggers, 1982] is not applicable. In that case, instead of uniform system (20) we have

$$Z_{xx}H_x + \left(Z_{xy}H_y - \zeta\right)H_y = x^*H_x^*,$$
$$\left(Z_{xy} + \zeta\right)H_y + Z_{yy} = x^*H_y^*.$$

These equations, in contrary to the above Eqs. (20), might not have a solution.

6. Conclusion. Even though magnetotelluric and magneto-variational methods of studying vertical and horizontal variations of electroconductivity in the vicinity of an observation point have been developed for quite a long time, they are still only weakly unified from theoretical, as well as methodical, point of view.

These methods are still based on empirical or heuristic considerations, they operate with auxiliary geometrical objects, which presumably reflect the structure of geoelectrical section or induced field.

The idea of unification of methods of magnetotelluric sounding, magneto-variational sounding with the help of spatial gradients of the field (horizontal spatial gradient analysis (HSG) and deep geomagnetic sounding (GDS)) can only be realized by using exact Eqs. (8, 9, 14) whose simplicity and physical meaning is almost apparent. It is important that in that case, the experiment is fully and uniformly conducted in terms of scalar input impedances and their horizontal gradients independently from the concept of impedance tensor, telluric and magnetic transient functions and vectors of induction. It is on contrary to CGDS method (comprehensive deep geoelectric sounding) which has a similar method of conducting field observations. Obviously, that this method requires that means and methods of analyzing and representing the observed data have to change considerably. It is also obvious that in this case, the general strategy of modeling and inversion has to undergo some changes.

Let us also point to somewhat indeterminate aspect of the proposed approach. The approach is based on a notion of «vicinity» of a point which does not have an exact definition (and possibly, physical meaning). As the result, the question of determining the extent of locality of the obtained information requires a special study.

Кредо — актуальное выступление на научных конференциях. Первая Международная конференция «Актуальные проблемы электромагнитных зондирующих систем», Киев, 27-30.09.2009 г.

Первая Международная конференция «Актуальные проблемы электромагнитных зондирующих систем», Киев, 27-30.09.2009 г.

Научные обсуждения доклада В. Н. Шумана
с академиком РАН М. И. Эповым.

«Простота — это то, что труднее всего на свете; это крайний предел опытности и последнее усилие гения» (Леонардо да Винчи).
В. Н. Шуман и И. Н. Корчагин.

В. Н. Шуман и соавторы: Ю. А. Богданов,
В. Н. Павлович и В. Д. Кукуруза.

Встречи с коллегами: В. П. Коболев, М. И. Эпов,
В. Н. Шуман, А. С. Лисин.

Двадцать лет назад. Геоэлектрики.
С. Н. Кулик, Т. К. Бурахович, Е. М. Тонковид, В. Н. Шуман.

В. Н. Шуман и член-корреспондент НАН Украины Р. И. Кутас.

Концепция динамически неустойчивой геосреды и сейсмоэлектромагнитный шум литосферы

Геофизический журнал,
№ 6, Т. 32, 2010, С. 101—118.

Введение. Как свидетельствует эксперимент, земная кора генерирует сейсмические колебания в чрезвычайно широком спектре частот — от сотен герц до ~10^{-4} Гц. Относительно низкочастотные волны являются собственными колебаниями Земли и подразделяются на сфероидальные (поляризация волн Рэлея) и крутильные (поляризация волн Лява). При этом их спектр (собственных колебаний) насчитывает несколько тысяч собственных частот [Геншафт, 2009]. На эти колебания накладываются сейсмические шумы разной природы (эндогенного и экзогенного происхождения) в широком диапазоне частот — от долей герца до килогерц. Структура сейсмического шума существенно неоднородна [Спивак, Кишкина, 2004]. Его характеристики определяются частотным диапазоном, методом регистрации, эффектами, связанными с распространениием сейсмических волн в реальной среде, характером распределения местных источников и зависят от резонансных свойств и релаксационных процессов данного массива горных пород.

Установлено, что даже небольшие по величине деформации, вызванные лунно-солнечными приливами, приводят к заметным амплитудным вариациям микросейсмических колебаний. При этом отклик микросейсмического поля наблюдается в характерных для конкретного участка земной коры интервалах [Кишкина, Спивак, 2003; Адушкин и др., 2008]. Показано, что барические вариации разного происхождения (вариации атмосферного давления) вызывают заметные изменения характеристик микросейсмических колебаний не только в длиннопериодной, но и в высокочастотной области [Адушкин и др., 2008].

Установлено, что земная кора является также электродинамически активной средой, способной генерировать электромагнитные возмущения в диапазоне частот от 10^{-4} до 10^{6} Гц [Гохберг и др., 1985; Сурков, 2000; Gershenson, Bambakidis, 2001; Гульельми, 2007].

Непрерывное шумовое сейсмическое и электромагнитное излучение, регистрируемое в геосреде в столь широком диапазоне частот, свидетельствует об исключительно высокой энергетической насыщенности литосферы и указывает на два существенных обстоятельства.

Первое — мы имеем дело со сложной и связанной структурной системой.

Второе — процессы, ответственные за изменчивость параметров в геосреде (от локальных до региональных), обусловлены, в основном, эндогенной активностью Земли. Действие же внешних экзогенных сил носит скорее подчиненный, хотя и очень важный характер [Геншафт, 2009]. Стало очевидным, что важные геолого-геофизические проблемы, в частности механизмы генерации и распространения сейсмического и электромагнитного шума, концентрируются в области быстрых процессов изменения физических параметров геосреды [Гуфельд, 2007]. При этом безосновательно противопоставлять или разграничивать сейсмическую (акустическую) и электромагнитную составляющие излучения. Существуют также весомые основания считать, что описание сейсмического и электромагнитного процессов невозможно без учета структурных свойств геосреды [Садовский, 2004].

Идеи об активной роли геосреды позволяют по-новому подойти ко многим проблемам геофизической науки, в частности к проблеме генерации сейсмоэлектромагнитного шума и прогноза сейсмической активности. Так, на основе анализа экспериментальных данных предложено получать информацию о динамике эндогенных процессов в геосреде из хаотических высокочастотных вариаций геофизических параметров, которые прежде отфильтровывались как неинформативные [Дещерский и др., 2003].

Отметим в этой связи, что последнее десятилетие характеризуется интенсивным проникновением в геофизическую науку методов нелинейной динамики. В частности, получен ряд результатов о динамике геосреды [Спивак, Кишкина, 2004], многие ее аспекты получили адекватную интерпретацию в терминах динамических систем [Геншафт, 2009]. Такие понятия, как регулярные и хаотические аттракторы, устойчивость, бифуркация и другие прочно вошли в обиход направления исследований, связанного с изучением Земли как открытой диссипативной системы, характерными свойствами которой являются:

1) диссипативность динамики;

2) компенсация энергетических потерь за счет действия внешних (эндогенных) источников;

3) активность составных элементов (блоков), способных генерировать разнообразные типы сейсмоэлектромагнитных колебаний: от простых одиночных импульсов до хаотических.

Свойства 1—3 являются, как известно, типичными характеристиками автоколебательных систем — важнейшего класса систем нелинейной физики [Некоркин, 2008]. Пришло понимание и осознание типичности хаотического поведения нелинейных систем: акцент современной теории автоколебаний сместился в сторону изучения все более сложных, в частности хаотических, колебаний. В ее основу положены следующие динамические принципы [Некоркин, 2008]:

– выделение и исследование структурно-устойчивых систем и явлений, которые при малых вариациях параметров в принципиальном плане не меняют своего поведения;

– анализ структуры разбиения фазового пространства (пространства состояний) системы на траектории, включающий исследование аттракторов (состояний равновесия, предельных циклов), что позволяет характеризовать типы поведения системы;

– исследование эволюции колебательных процессов при изменении контрольных параметров и выявления бифуркаций (критических точек), определяющих принципиальную перестройку этих процессов, т. е. состояний, когда любое случайное воздействие (флуктуация) задает выбор дальнейшего пути развития.

Характеристикой бифуркации является «шум», который может быть трех видов: белый, коричневый и фликкер-шум [Геншафт, 2009]. Белый представляет колебания одинаковой амплитуды с произвольными частотами и фазами при нулевом среднем значении. Коричневый — трехмерная сильно коррелирующая последовательность с памятью предшествующих шагов. Фликкер-шум (шум мерцания, на поведение системы которого некоторое воздействие оказывают прошлые события) наиболее распространен в природе. Для фликкер-шума свойственна степенная асимптоматика спектра ($A \sim f^{k}$), где A — квадратный корень из амплитуды спектра мощности, f — частота, k — параметр (для «белого» шума $k=0$), которая указывает на существование связи между текущей динамикой системы и прошлыми событиями в ней.

Однако, к сожалению, нелинейно-динамические подходы к анализу геосистем сталкиваются со значительными трудностями, связанными с их необычностью, сложностью, в частности с отсутствием во многих случаях понимания архитектуры блоков и принципов межблочных взаимодействий. Следует упомянуть в этой связи явление индуцированной шумом упорядоченности, которая возникает при стохастической синхронизации (эффект стохастического резонанса). Эффект стохастического резонанса определяет группу явлений, при которых отклик нелинейной системы на слабый внешний сигнал увеличивается с ростом интенсивности шума в системе, и представляет собой фунда-

ментально общее физическое явление, типичное для нелинейных систем, где с помощью шума можно контролировать один из характерных временных масштабов системы [Анищенко и др., 1999; Климонтович, 1999].

В представленном контексте становится очевидной необходимость более адекватного электродинамического описания геосреды и, в частности, электродинамики активных сред с самоподобной структурой [Шуман, 2010].

Лабораторные эксперименты. К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал по изучению электромеханических процессов, связанных с деформированием и/или разрушением образцов горных пород. Установлено, что динамическое деформирование и разрушение твердых тел, как правило, сопровождаются разнообразными, в том числе электромагнитными, эффектами [Сурков, 2000]. В частности, при разрушении относительно небольших по размеру образцов наблюдались такие эффекты, как генерация электромагнитных возмущений радиодиапазона, эмиссия заряженных частиц, рентгеновское излучение, микроразряды в трещинах. При этом напряженность электрического поля в трещинах может достигать 10^8—10^9 В/м и приводить к появлению газоразрядной микроплазмы [Сурков, 2000].

Эксперименты по ударному сжатию веществ показали, что на фронте ударной волны всегда возникает скачок электрического потенциала, а в магнитных материалах возникают эффекты их ударного размагничивания.

Большое внимание уделялось также сейсмическим явлениям, т. е. электромагнитным процессам, сопутствующим распространению сейсмических волн [Сурков, 2000; Gershenson, Bambakidis, 2001; Гульельми, 2007].

Как показали лабораторные эксперименты, электромагнитные сигналы (импульсы) появляются синхронно с акустической эмиссией разрушаемого образца. В некоторых работах отмечается, что электромагнитные сигналы более интенсивны на ранних стадиях нагружения образца, в то время как акустическая эмиссия достигает максимальных значений к моменту его пол-

ного разрушения. При этом спектр электромагнитного излучения, генерируемого при разрушении образцов горных пород, достаточно широк — от 10 Гц до 1 МГц. Максимум его интенсивности приходится на диапазон 1—50 кГц [Сурков, 2000].

На протяжении длительного времени опыт, идеи и результаты лабораторного моделирования процессов генерации широко использовались в постановке электромагнитного мониторинга геосреды и интерпретации его результатов. Однако, к сожалению, этот опыт не приблизил нас к решению ряда актуальных задач изучения вариаций сейсмоакустической и радиоволновой эмиссии литосферы [Шуман, Богданов, 2008; Богданов и др., 2009б,в]. При этом зачастую не учитывается тот факт, что электромагнитные поля радиоволнового диапазона сильно поглощаются в относительно проводящей геосреде и поэтому не могут выйти на дневную поверхность из глубинных ее областей, а в приповерхностных слоях довольно трудно обнаружить достаточное количество их источников, чем и обусловлен скептицизм ряда авторов в отношении его использования при изучении глубокозалегающих объектов. Тем не менее обширный полевой эксперимент свидетельствует об обратном [Богданов и др., 2003, 2007; Богданов и др., 2009а; Старостенко и др., 2009]. В итоге стала очевидной недостаточность представлений физики и механики разрушения лабораторных образцов для анализа процессов его генерации. Геосреда существует и эволюционирует в пространстве и времени в существенно более широких рамках, чем в любых экспериментах, а адекватная формализация процесса генерации электромагнитной эмиссии и механических вибраций нуждается в качественно новых моделях, которые позволили бы анализировать пространственно-временную структуру поля микросейсмических и электромагнитных колебаний, регистрируемую на земной поверхности. Анализу ключевых аспектов этой проблемы, состоянию теоретических и экспериментальных исследований в этой области, полученных в последние годы, посвящен цикл работ, опубликованных в «Геофизическом журнале» [Шуман, 2007, 2008б; Богданов, 2008; Богданов, Павлович, 2008; Шуман, Богданов, 2008;

Богданов и др., 2009б,в; Старостенко и др., 2009 и др.]. Однако, учитывая многоаспектность и комплексный характер проблемы, пробелы в понимании процессов в Земле и трудностей в трактовке изменений ее параметров во времени, неточность, ограниченность и расплывчатость представлений механоэлектромагнитных преобразований и условий распространения возмущений диктуют необходимость продолжения исследований в этой области, акцентируя внимание на сопоставление теоретических выводов с результатами полевых наблюдений. Конкретизации механизмов генерации высокочастотного сейсмоэлектромагнитного шума, детализации электродинамической стороны проблемы и посвятим дальнейшее изложение.

Геосреда и природа электромагнитного шума. В соответствии с классическими представлениями генерацию электромагнитного шума (импульсного электромагнитного излучения литосферного происхождения) обычно связывают с образованием заряженных дислокаций, трещинообразованием, нарушением связей адгезионной природы, электрокинетическими явлениями, релаксационными и разрядными процессами, пьезоэлектрическим эффектом и другими механизмами разделения зарядов [Сурков, 2000; Мальцев, Моргунов, 2005]. А. В. Гульельми введены представления об инерционном, индукционном, пьезомагнитном и деформационном механизмах генерации переменного магнитного поля **B** [Гульельми, 2007]. Предложена модель генерации и распространения сейсмоэлектрических сигналов, основанная на агрегационном механизме образования микротрещин. Этот механизм связан с образованием зарядов и формированием разрядного процесса в полостях микротрещин [Неновски, Бойчев, 2004]. Однако сильное поглощение микросейсмических, а особенно электромагнитных волн радиоволнового диапазона в земной коре порождает известные проблемы: для трассы распространения с удельной проводимостью $\sigma \approx 10^{-1} \div 10^{-3}$ См/м на частотах 10^4—10^6 Гц коэффициент затухания превышает 10^2—10^3 Дб/км [Гохберг и др., 1979]. В результате электромагнитные возмущения данного частотного диапазона с точки зрения классической электродинамики не

могут выйти к поверхности Земли из областей генерации, глубина погружения которых превышает мощность скин-слоя (100—150 м). Понятно, что в этом случае на передний план выступают неустойчивые системы и возбудимые среды, демонстрирующие большое разнообразие типов поведения и самоорганизации.

Очевидно, в рамках таких представлений природная среда, стремящаяся к самоорганизации, нуждается в новых моделях описания, которые бы позволили анализировать диссипацию поступающей в нее из земных недр энергии, релаксацию локальных напряжений, стационарные режимы деформирования, вопросы генерации сейсмоэлектромагнитных возмущений и их распространения. В частности, в сейсмологии получила известность концепция самоорганизации статистических систем в критическом состоянии — SOC (Self-Organized Criticality [Bak, Tang, 1989]). Для развития работ этого цикла в качестве ее обобщения недавно предложена более совершенная модель структурной организации сейсмогенерирующей среды, более полно учитывающая некоторые новые представления о самоподобной эволюции материала земной коры в условиях неравновесного состояния — модель самоподобной сейсмогенерирующей структуры (ССС), обладающая достаточно развитым математическим аппаратом [Стаховский, 2007].

Наиболее близка к модели ССС — блочно-иерархическая модель М. А. Садовского и В. Ф. Писаренко [Садовский, Писаренко, 1991]. Однако, по мнению И. Р. Стаховского, эта модель уступает модели ССС в степени математической формализации процессов эволюции материала земной коры, хотя последнее утверждение и является спорным. В этой связи достаточно упомянуть работы В. А. Даниленко и других, в которых приведены уравнения движения сред иерархической структуры, учитывающие как блочно-иерархическую структуру геосреды, так и волновые процессы в самих блоках [Даниленко, 1992]. Напомним, что самоорганизация сейсмогенерирующей среды выражается в появлении в ней масштабно-инвариантной структуры, вызванной неравновесным состоянием земной коры под

непрерывным воздействием тектонических напряжений [Стаховский, 2007]. Разумеется, в рамках упомянутых моделей геосреды вопросы генерации электромагнитного шума не рассматривались.

Что же в действительности представляет собой геофизическая среда? Это несплошная, неоднородная, нелинейная диссипативная система, отличительными признаками которой являются необратимые изменения во времени, фрактальность, недетерминированность поведения после прохождения и критической точки (бифуркации), волновая и резонансная природа всех процессов, самоорганизация (хаотический порядок), большая, а иногда и определяющая роль малых возмущений [Геншафт, 2009].

Как известно, диссипативные системы (или структуры) обладают выраженной особенностью сильных изменений под действием слабых воздействий. Геосреда энергетически насыщенна, т. е. находится в неравновесном состоянии. Ее физико-химические параметры непрерывно меняются не только в пространстве, но и во времени. При этом изменения параметров геосреды могут быть очень быстрыми [Гуфельд, 2007].

Какова же природа быстрой изменчивости параметров геосреды, в частности изменчивости ее объемно-напряженного состояния? Как уже упоминалось, геосреда непрерывно подвергается действию разномасштабных внутренних и внешних сил. При этом под внешними силами подразумевается эволюция приливных деформаций в системе Земля—Луна—Солнце, а под внутренними — широкий спектр физико-химических процессов в системе ядро—мантия—литосфера, включая эффекты взаимодействия восходящих флюидных потоков (в частности, потоков легких газов — водорода, гелия и др.) с твердой фазой литосферы [Гуфельд, 2007].

Как известно, глубинный флюид представляет собой сложную открытую энергетически концентрированную динамическую систему, постоянно меняющую свои свойства и состав. Скорость перемещения флюида зависит от энергетических особенностей системы и внешних условий. Полагают, что выше

границы Мохо легкие газы растворены во флюиде и твердой фазе. Их восходящий поток обусловлен градиентами напряжений и температуры и происходит по каналу твердое тело — флюид — твердое тело. Ниже этой границы поток легких газов может осуществляться только через твердую фазу за счет диффузии [Гуфельд, 2007]. Из-за высокой подвижности легких газов происходит увеличение объема элементарной решетки. В итоге в условиях взаимодействия с непрерывным и переменным потоком восходящих легких газов твердая фаза геосреды будет испытывать макроскопические деформационные эффекты, аналогичные радиационной ползучести и распуханию. При этом меняются объемы различных элементов (блоков) среды, что приводит к несинхронным вариациям ее объемно-напряженного состояния.

И. Л. Гуфельд рассматривает три основных процесса, обуславливающих неустойчивость литосферы при прохождении через нее легких газов: формирование пористости с высоким внутренним давлением газов, междоузельная диффузия, фазовые переходы по высокотемпературному типу в присутствии гелия [Гуфельд, 2007].

Существенно, что эти процессы сопровождаются потерей электронейтральности и, следовательно, изменением во времени электромагнитных параметров геосреды. Эти же представления положены И. Л. Гуфельдом в основу физико-химической модели сейсмичности (концепция динамической неустойчивой среды) [Гуфельд, 2007]. При этом сейсмический процесс реализуется преимущественно вдоль границ блоков, где наблюдается наиболее активная циркуляция флюидной фазы и возможно непосредственное поступление газовых компонент из мантии Земли. При этом активизация высокочастотного сейсмического шума является, по мнению И. Л. Гуфельда, основным следствием пространственно-временной импульсной дегазации, контролирующей сейсмотектонический процесс.

Заметим, что взаимодействие флюидных потоков и тектонического деформирования сопровождается нелинейными процессами, причем участие флюидов служит основным фак-

тором, определяющим нелинейность. При этом механизм самоорганизации (хаотический порядок) реализуется посредством «взаимного возбуждения»: флюидные потоки активизируют тектонические процессы, а последние приводят к усилению миграции флюидов, причем инициирующим может быть любой из них [Гуфельд, 2007]. Такая энергетическая подкачка геосреды способствует формированию активных систем, характеризующихся нелинейной динамикой комплекса физических полей и автоволновыми механизмами переноса флюидов [Дмитриевский, 2008]. На энергетических потоках в таких системах возможно возникновение статических, пульсирующих или бегущих областей концентрации флюида, которые получили название автоволн, подчеркивая, таким образом, тот факт, что их характеристики (форма, скорость распространения и др.) определяются, в основном, параметрами среды. Автоволны взаимодействуют между собой: в итоге «выживает» наиболее устойчивая геометрически простая конфигурация со стоячими волнами. Очевидно, электродинамика такой самоподобной самоорганизующейся структуры (геосреды) оказывается тесно связанной с ее механикой, флюидодинамикой и термодинамикой. В итоге при описании взаимосвязанных механических, тепловых, диффузионных и электромагнитных процессов в геосреде основными являются уравнения баланса энергии, количества движения, энтропии, заряда, массы и уравнения Максвелла.

Имеются ли прямые экспериментальные свидетельства в пользу обоснования предложенной И. Л. Гуфельдом концепции динамически неустойчивой геосреды? Очевидно, да: при имплантации в образцы горных пород водорода и гелия в концентрациях, соответствующих реальной в литосфере Земли, деформации достигают величин 0,01—0,06, значительно превышающих значения предельных разрушающих деформаций в ней — 0,0001 [Гуфельд, 2007]. Следовательно, можно ожидать, что в ряде случаев предельные деформации могут быть достигнуты при весьма небольших вариациях восходящих потоков водорода и гелия. Кроме того, вакуумирование образцов кварцита приводит к его деформации примерно на 0,5 %. Таким об-

разом, динамические явления и вариации параметров геосреды в принципе могут рассматриваться на основе представлений о реакции блочной геосреды на восходящие потоки легких газов.

О механизмах генерации и распространения электромагнитного шума. Сосредоточим далее внимание на электродинамической стороне проблемы. Согласно приведенным соображениям, неравновесность, нелинейность, неустойчивость реальной структуры геосреды — основные предпосылки или исходные принципы, на которых должна строиться теория спонтанной электромагнитной эмиссии литосферы [Шуман, 2010].

Как известно, нелинейные диссипативные системы обладают особенностью достаточно сильных изменений под действием очень слабых воздействий. При этом восходящие потоки легких газов могут выступать в качестве основного фактора, контролирующего текущую неустойчивость литосферы и стимулирующего обмен энергий между отдельными элементами или подсистемами геосреды. Изменение структуры напряженно-деформированного состояния и механических свойств (в частности, проницаемости) разломных зон в результате деформаций, вызванных блоковыми движениями, в свою очередь определяют вариации флюидодинамического режима, тепловых и эманационных потоков из недр, режима релаксационных процессов, а также условия разделения электрических зарядов и нарушения токовых систем [Спивак и др., 2009].

Как уже упоминалось, распространение фронта концентрации флюида в геосреде по своей сути является автоволновым, в результате чего система переходит из одного состояния в качественно иное [Дмитриевский, 2008; Дмитриевский, Володин, 2008]. В частности, в стандартной постановке задачи используемая система уравнений допускает стационарное автоволновое решение в виде распространяющегося фронта концентрации флюида [Дмитриевский, Володин, 2008]. Очевидно, этот процесс сопровождается потерей электронейтральности среды и изменением во времени ее физических (в том числе электромагнитных) свойств за счет образования, раскрытия и закрытия трещин, изменения структуры порового пространства, пере-

распределения в нем флюида, изменения порового давления в порах и трещинах и, как следствие, изменения электропроводности и диэлектрической проницаемости среды. В итоге с фронтом концентрации флюида может быть связано формирование и распространение фронта волны (автоволны) комплексной диэлектрической проницаемости или, точнее, волны тензора комплексной диэлектрической проницаемости с учетом неоднородности и трехмерного характера структуры.

Как известно [Гинзбург, Цытович, 1984], переходный процесс в нестационарной среде называется переходным рассеиванием, а излучение заряда может быть связано не только с его ускорением, но и с изменением во времени фазовой скорости распространения электромагнитной волны в окружающей среде. С этой точки зрения любое переходное излучение (рассеяние) можно рассматривать как процесс рассеивания (трансформации) возмущения или импульса волны комплексной проницаемости, связанной с распространяющимся фронтом концентрации флюида, образованием электромагнитных, а в принципе — и других волн [Гинзбург, Цытович, 1984].

Иначе говоря, в этом случае «волна» тензора комплексной диэлектрической проницаемости (которая, в принципе, может быть как стоячей, так и бегущей) как бы рассеивается на неподвижных или движущихся зарядах, сгустках зарядов или диполей, находящихся в среде, порождая электромагнитное (переходное) излучение. При этом, если энергия физических полей не превышает некоторый критический уровень, возникает генерация электромагнитно-акустических возбуждений в диапазонах кГц—Гц, наблюдаемых в эксперименте [Дмитриевский, Володин, 2006].

Это рассеяние, очевидно, коренным образом отличается от обычного, связанного с колебаниями частицы в поле падающей волны. Его изучению посвящена обширная литература [Гинзбург, Цытович, 1984]. В большинстве опубликованных работ этого направления обычно изучается частотный спектр и угловое распределение переходного излучения (рассеяния). В частности, показано, что оно сосредоточено в некотором «конусе»,

зависящем от угла излучения между волновым вектором **k** и скоростью **V** заряда. При этом роль скорости заряда **V** играет скорость, с которой движется фронт волны диэлектрической проницаемости [Гинзбург, Цытович, 1984]. Существенно, что параметры «конуса излучения» практически не зависят от электромагнитных характеристик среды распространения, что, в принципе, и демонстрирует полевой эксперимент [Шуман, Богданов, 2008].

Однако в задачах о переходном излучении (рассеянии) правомерна и другая постановка вопроса: как ведет себя это электромагнитное поле в выбранной точке пространства и в заданный момент времени [Болотовский, Серов, 2009]. Вопрос актуален в связи с тем обстоятельством, что в этом электромагнитном поле присутствуют не только излучаемые поля (волны), но и неизлучаемые, связанные с движущимися или неподвижными зарядами (так называемые «собственные поля»). Иначе говоря, в реальном эксперименте следует различать две его компоненты, два типа слагаемых — излучаемые и неизлучаемые поля (свободные и связанные поля).

Как известно, свойства этих частей единого переходного излучения (рассеяния) существенно различаются между собой. Излучаемое (бегущее, распространяющееся) поле может существовать без источника, его породившего, в то время как связанное (ближнее квазистационарное) поле полностью связано с источником. Существенно, что характерный масштаб распространяющихся волн порядка длины волны в среде распространения, а у ближнего квазистационарного поля этот масштаб может быть порядка расстояния от источника до поверхности (границы раздела «земля—воздух»), на которой выполняются измерения. При этом процессы механоэлектромагнитных преобразований преимущественно реализуются вдоль границ блоков и ослабленных зон, где происходит наиболее активная циркуляция флюидной фазы.

Уравнение генерации. Как уже упоминалось, при рассмотрении процессов генерации и распространения шумового сейсмического и электромагнитного излучений на передний

план выступают открытые, диссипативные системы и активные (возбудимые) среды, демонстрирующие большое разнообразие типов динамического поведения и самоорганизации. Общей теории таких сред и процессов в них, как известно, не существует и каждый подробно исследованный пример, как правило, демонстрирует новые типы их динамического поведения и самоорганизации [Давыдов и др., 1991].

Общепринятым описанием возникновения и эволюции пространственно-временных структур в возбудимых (активных) средах являются многокомпонентные системы уравнений типа «реакция—диффузия» [Давыдов и др., 1991; Шмидт, 2007]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\alpha\left(U\right)\frac{\partial}{\partial x}U \right) + F\left(U\right), \qquad (1)$$

где $\alpha(U)$ — коэффициент диффузии.

С учетом универсального характера данного обстоятельства в работе [Шуман, 2007] предложено обобщенное нелинейное уравнение генерации переменного магнитного поля **B**:

$$\frac{\partial B_i}{\partial t} = \alpha_{ij}\nabla^2 B_j + F_i\left(\mathbf{B}\right), \qquad (2)$$

где B_i — компонента магнитной индукции; $\alpha_{ij} = c^2/4\pi\sigma_{ij}$ — матрица диффузии; $F_i(\mathbf{B})$ — нелинейная функция, определяемая динамичностью процессов взаимодействия геосреды с восходящими потоками легких газов и экзотермических реакций и, в конечном счете, разнообразием механизмов механоэлектромагнитных преобразований. При этом характеристики электромагнитных возмущений (импульсов или автоволн) определяются параметрами среды.

Как свидетельствует опыт описания активных сред, основные закономерности образования автоволновых структур могут быть воспроизведены уже в рамках двух-трехкомпонентной системы [Давыдов и др., 1991], которую, с учетом (2), в простейшем случае можно записать в форме

$$\frac{\partial B_i}{\partial t} = \alpha_{ij}\nabla^2 B_j + F_i\left(\mathbf{B},\mathbf{G}\right),$$

$$\frac{\partial G_i}{\partial t} = \beta_{ij}\nabla^2 G_j + \varepsilon P_i\left(\mathbf{B},\mathbf{G}\right), \qquad (3)$$

где функция **G** определяет интенсивность динамических источников в геосреде. Функция P_i(**B, G**), в принципе, может быть монотонной или даже линейной [Давыдов и др., 1991], в то время, как функция F_i(**B, G**) обычно задается полиномами или кусочно-линейными функциями. Предельный случай — когда $\varepsilon = 0$ соответствует однокомпонентной системе.

Уравнения (3) представляют собой достаточно сложную систему нелинейных уравнений в частных производных второго порядка. Обзор возможных путей и методов ее решения, а также анализ особенностей этой системы приведен в статье [Цифра, Шуман, 2010]. В частности, с целью упрощения анализа уравнения (2) в этой работе предлагается использовать его симметрию. Симметрийный метод позволяет свести это уравнение или систему (3) в частных производных параболического типа к изучению системы обыкновенных дифференциальных уравнений. С этой целью может быть использован как классический теоретико-групповой подход, так и его обобщение — метод условной инвариантности.

Рассмотрим несколько примеров, конкретизируя вид функции **F**(**B**). Полагая, что

$$\mathbf{F}(\mathbf{B}) = \alpha\nabla\times\frac{\partial\mathbf{V}}{\partial t},$$

где **V** — скорость перемещения горных пород, α — коэффициент механомагнитной трансформации, приходим к известному уравнению генерации переменного магнитного поля:

$$\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} = \alpha\times\frac{\partial\mathbf{V}}{\partial t} + \frac{c^2}{4\pi\sigma}\nabla^2\mathbf{B}, \qquad (4)$$

описывающему так называемый инерционный механизм генерации **B** [Гульельми, 2007]. Видно, что источниками поля **B** в данном случае служат вихревые линии поля ускорений $\mathbf{A}=\partial\mathbf{V}/\partial t$. Задавая же **F**(**B**) в форме

$$\mathbf{F}(\mathbf{B}) = \nabla(\mathbf{V}\mathbf{B}_0),$$

где $\mathbf{B}_0$ — главное геомагнитное поле, процесс генерации опишем в виде уравнения

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B}_0) + \frac{c^2}{4\pi\sigma}\nabla^2 \mathbf{B} \quad , \tag{5}$$

совпадающего с одним из линеаризованных уравнений магнитной гидродинамики [Гульельми, 2007]. Сущность этого механизма, называемого индукционным, состоит в том, что движение проводящей геосреды (для простоты геосреда считается однородной) в постоянном магнитном поле земного ядра индуцирует токи, возбуждающие переменное поле **B**.

Можно попытаться учесть другие основные элементы механики геосреды — скорость, ускорение, деформацию и напряжение, и записать более общее уравнение генерации в виде [Гульельми, 2007]

$$\frac{\partial B}{\partial t}(\mathbf{x}, t) = \frac{c^2}{4\pi\sigma}\nabla^2 \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) + \nabla \times \mathbf{c}(\mathbf{x}, t), \tag{6}$$

где

$$\mathbf{c} = \alpha \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}_0 + \beta\theta \mathbf{E}_0 + \nabla \times \mathbf{M},$$

$\theta = \nabla \mathbf{U}$, $\mathbf{U}(\mathbf{x}, t)$ — поле смещений,

$$\beta = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \theta}; \; M_i = \left(\gamma_1 P_{\|}\, \delta_{ij} + \gamma_2 P_{ij}\right) B_{0j}.$$

Для простоты предполагается, что проводимость среды σ, параметры механомагнитной трансформации α, β, γ_1, γ_2, а также сторонние поля $\mathbf{E}_0$ и $\mathbf{B}_0$ однородно распределены в пространстве и не зависят от времени *t*.

Уравнение (6) учитывает, в принципе, основные элементы механики геосреды и соответственно указанные ранее четыре механизма генерации — инерционный, индукционный, пьезомагнитный и деформационный — и позволяет выполнить сравнительный анализ их эффективности [Гульельми, 2007].

Очевидно, эти результаты действительны лишь для диапазона частот, в котором скин-глубина в геосреде достаточно велика и соответственно эти возмущения могут выйти на поверхность из области их генерации. Однако они не объясняют механизм дальнего распространения и выхода на дневную поверхность излучения на частотах в десятки и сотни кГц, регистрируемого экспериментально.

Акцентируя внимание на данном аспекте проблемы, в отличие от классического подхода в данной работе к базовым моделям механоэлектромагнитных трансформаций отнесено переходное излучение (рассеяние) в нестационарной геосреде, генерируемое полем зарядов в «волне» тензора комплексной диэлектрической проницаемости, формируемой и связанной с распространяющимся фронтом возмущений концентрации геофлюидов на энергетических потоках из недр Земли. В этом случае, как уже отмечалось, волна (импульс) тензора комплексной диэлектрической проницаемости (бегущая или стоячая) рассеивается на неподвижных или движущихся зарядах в среде, порождая переходное электромагнитное излучение. При этом происходит взаимодействие между импульсами возмущений тензора комплексной диэлектрической проницаемости, связанной с распространяющимися фронтами концентрации флюида, и электромагнитного поля. Можно думать, что в этом случае, исходя из предложенной И. Л. Гуфельдом концепции динамически неустойчивой геосреды, ориентированной первоначально на объяснение сейсмичности разного ранга, появляется возможность описания электромагнитного шума литосферы в рассматриваемом килогерцовом диапазоне частот, включая и проблему его выхода на дневную поверхность из областей генерации, глубина залегания которых превышает мощность скин-слоя на этих частотах. Во всяком случае противопоставлять или разграничивать сейсмоакустическую и электромагнитную составляющие излучения представляется безосновательным, а упоминавшиеся ранее проблемы и затруднения на этом пути были, очевидно, обусловлены отсутствием адекватных представлений о геосреде как открытой диссипативной

системе и сложностью понимания физики процессов быстрых временных изменений ее параметров.

Проблематичность применения классических подходов к описанию процесса генерации и распространения электромагнитного шума рассматриваемого частотного диапазона здесь просматривается особенно рельефно. В частности, в рассматриваемом случае необходимо предположить, что плотность наведенного в геосреде тока определяется не только напряженностью электрического поля в рассматриваемой точке среды, но и тем, как быстро оно изменяется в ее окрестности. Тогда в рассматриваемой анизотропной структуре (геосреде) обобщенный закон Ома в дифференциальной форме примет следующий вид [Бредов и др., 1985]:

$$J_\alpha = \sigma_{\alpha\beta}\ E_\beta + \zeta_{\alpha\beta x}\frac{\partial E_\beta}{\partial x_x}, \qquad (7)$$

где по повторяющимся индексам производится суммирование от 1 до 3.

Соответственно система уравнений Максвелла примет следующий вид:

$$\left(\nabla \times \mathbf{H}\right)_x = e_{\alpha\beta x}\frac{\partial H_\beta}{\partial x_\alpha} = \frac{4\pi}{c}J_\alpha$$

$$\left(\nabla \times E\right)_x = e_{\alpha\beta x}\frac{\partial E_x}{\partial x_\alpha} = -\frac{1}{c}\frac{\partial B_x}{\partial t}, \qquad (8)$$

где $e_{\alpha\beta x}$ — единичный антисимметричный тензор III ранга,

$$e_{123} = e_{321} = e_{231} = 1,$$

$$e_{213} = e_{321} = e_{132} = -1,$$

все остальные $e_{\alpha\beta x}$, у которых хотя бы два индекса одинаковы, равны нулю. Ясно, что в этом случае не удается выписать обобщенное уравнение генерации способом, аналогичным [Левшенко, 1995; Гульельми, 1995].

Классическая электродинамика материальных сред и электродинамика геосреды. Как известно, при анализе взаимо-

действия электромагнитного излучения с материальной средой исходной является система уравнений Максвелла для электромагнитного поля в среде, которая следует непосредственно после усреднения по статистическому ансамблю микроскопических уравнений Максвелла, справедливых всегда, когда справедлива сама классическая теория электромагнитного поля [Ландау, Лившиц, 1959; Бредов и др., 1985]:

$$\mathrm{rot}\mathbf{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},\ \mathrm{rot}\mathbf{B} = \frac{1}{c}\ \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c}\left(\mathbf{J} + \mathbf{J}_{\mathrm{ext}}\right), \tag{9}$$

$$\mathrm{div}\mathbf{B} = 0,\ \mathrm{div}\mathbf{E} = 4\pi\left(\rho + \rho_{\mathrm{ext}}\right),$$

где **E** — напряженность макроскопического электрического поля, **B** — вектор магнитной индукции, **J** и ρ описывают реакцию вещества на электромагнитное поле, а $\mathbf{J}_{\mathrm{ext}}$ и ρ_{ext} — сторонние токи и заряды, не зависящие от **E** и **B** (плотность тока и плотность заряда внешних источников).

Название «сторонние» означает, что динамика процессов не влияет на какие-либо их характеристики, которые могут быть обусловлены и неэлектромагнитными процессами, тогда как индуцированные токи и заряды в общем случае являются функционалами напряженностей полей, которые, в свою очередь, определяются суммой индуцированных и сторонних токов и зарядов. Сторонние и индуцированные токи и заряды по отдельности, а также их сумма связаны соответствующими уравнениями непрерывности. Физический смысл напряженности электрического поля **E** и магнитной индукции **B**, входящие в уравнения (9), однозначно определяются выражением для силы Лоренца, действующей на пробный элементарный заряд q, движущийся со скоростью **V**:

$$\mathbf{F} = q\left(\mathbf{E} + \frac{1}{c}\mathbf{V} \times \mathbf{B}\right). \tag{10}$$

Усреднение по физически малым объемам и промежуткам времени адекватно процедуре измерения полей макроскопическим прибором, так как такой прибор (из-за конечных разме-

ров датчиков и их инерционности) производит усреднение в процессе измерения.

Усредненные по ансамблю уравнения Максвелла и следствия из них и являются предметом изучения электродинамики сред.

Легко видеть, что система (9) не является замкнутой, так как подразумевается, что величины **J** и **r** зависят от векторов поля **E** и **B**, но вид этой связи (материальные уравнения) не конкретизируется и не используется [Ландау, Лившиц, 1959; Бредов и др., 1985]. Обычно при анализе системы уравнений (9) ток **J** представляют в виде суммы двух составляющих:

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} + c\,\mathrm{rot}\mathbf{M}$$

И вводят векторы индукции электрического поля **D** и напряженность магнитного поля **H**:

$$\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P}\,,\ \ \mathbf{H} = \mathbf{B} - 4\pi\mathbf{M}\,,$$

где **P** и **M** — макроскопические плотности электрического и магнитного дипольных моментов среды. Смысл этих векторов заключается в том, что они учитывают наведенные в среде заряды и токи. В этом случае система уравнений Максвелла (9) примет вид

$$\mathrm{rot}\mathbf{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}\,,\ \ \mathrm{rot}\mathrm{H} = \frac{4\pi}{c}\mathbf{J}_{\mathrm{ext}} + \frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{D}'}{\partial t}\,,$$

$$\mathrm{div}\,\mathrm{B} = 0,\quad \mathrm{div}\mathbf{D}' = 4\pi\rho_{\mathrm{ext}}\,. \qquad (11)$$

Система (11) содержит четыре вектора: **E**, **B**, **D** и **H**. Поэтому она также не замкнута и ее следует дополнить уравнениями, устанавливающими связи между этими четырьмя векторами поля. Напомним, что уравнения связей, в отличие от системы (11), не носят универсальный характер и определяются конкретными свойствами рассматриваемой среды. В большинстве случаев эти связи предполагаются линейными. Наиболее общая форма линейных материальных уравнений, связывающих век-

тор **D** с вектором **E** и **B** с **H**, есть интегральное тензорное соотношение вида [Агранович, Гинзбург, 1979]

$$D_\alpha(\mathbf{r},t) = \int_{-\infty}^{t} dt' \int dv' \varepsilon_{\alpha\beta}(t,\mathbf{r};t',\mathbf{r}') E_\beta(r',t'), \qquad (12)$$

где $\varepsilon_{\alpha\beta}$ — некоторая действительная тензорная функция (функция отклика). Тензорный характер функции отклика $\varepsilon_{\alpha\beta}$ отражает анизотропию свойств среды: в анизотропных средах направление векторов **D** и **E** могут не совпадать, в этом случае $\varepsilon_{\alpha\beta}$ является тензором второго ранга. В изотропных средах **D** и **E** (**B** и **H**) коллинеарны и тензор $\varepsilon_{\alpha\beta}$ пропорционален единичному тензору $\delta_{\alpha\beta}$.

В случае медленно изменяющихся в пространстве и времени полей оператор $\varepsilon_{\alpha\beta}$ (или $\mu_{\alpha\beta}$) может свестись просто к умножению величины **E** и **H** на некоторую алгебраическую величину, т. е.

$$\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E}, \ \mathbf{B} = \mu\mathbf{H}, \ \mathbf{j} = \sigma\mathbf{E}. \qquad (13)$$

Плотность наведенного в среде тока может, вообще говоря, определяться не только напряженностью электрического поля в рассматриваемой точке, но и тем, как быстро оно изменяется от точки к точке. В этом случае связь между током и напряженностью электрического поля имеет вид (7) [Бредов и др., 1985].

На поверхностях раздела сред, где ее свойства меняются скачком, дифференциальные уравнения (11) теряют силу и должны быть заменены соответствующими граничными условиями для векторов поля (для тангенциальных — индекс τ и нормальных к границе раздела компонент полей):

$$B_{2n} = B_{1n}, \ D_{2n} - D_{1n} = 4\pi\sigma_{\text{ext}},$$

$$\mathbf{E}2\tau = \mathbf{E}1\tau, \ \mathbf{H}1\tau - \mathbf{H}2\tau = \frac{4\pi}{c} i_v^{\text{ext}}, \qquad (14)$$

где i_v^{ext} и σ_{ext} — плотности стороннего поверхностного тока и стороннего поверхностного заряда соответственно.

Заметим, что согласно внутренней логике электродинамики вначале идут уравнения Максвелла, затем материальные уравнения и только потом граничные условия, выражения для энергии и т. д., которые являются следствием уравнений Максвелла и материальных уравнений и поэтому могут изменяться при изменении последних. Поэтому было бы ошибочным рассматривать граничные условия и материальные уравнения независимо друг от друга [Ландау, Лившиц, 1959; Голубков, Макаров,1995].

Теперь снова обратимся к вопросу о физическом смысле полей, появляющихся в уравнениях Максвелла (9) — (11). Согласно (10), поля **E** и **B**, стоящие в уравнениях Максвелла, определяются без решения этих уравнений, рассматривая лишь движение пробной заряженной частицы в вакууме (постулат Розенфельда). Следовательно, по крайней мере в вакууме мы имеем независимое определение полей **E** и **B**. Однако в случае конденсированных сред это определение становится проблематичным: любая заряженная частица, движущаяся через такую среду, неизбежно испытывает влияние этой среды и описание этого влияния не сводится к подстановке в выражение для силы Лоренца (10) макроскопических полей. Пробная частица поляризует окружающую среду, что приводит к дополнительной силе. Очевидно, для использования постулата Розенфельда необходимо знать явный вид этой силы, которая, в свою очередь, зависит от вида материальных уравнений. В итоге мы оказываемся в замкнутом круге: определение полей посредством силы Лоренца возможно только после определения полей [Виноградов, 2002]. Согласно работе [Виноградов, 2002], возможен другой способ определения полей **E**(**D**) и **B**(**H**), связанный с определением граничных условий (метод полости): поле внутри полости в среде равно **E**(**H**), если полость вытянута вдоль силовых линий. Если же полость сплюснута, то поле в ней равно **D**(**B**). Этот факт — следствие обычных максвелловских граничных условий (непрерывность тангенциальных составляющих полей **E** и **H**). В итоге, если предположить, что эти граничные условия имеют силу, получим метод измерения всех полей. Следова-

тельно, задание граничных условий является необходимым и достаточным условием решения рассматриваемой проблемы. В свою очередь, законность максвелловских граничных условий может быть доказана только экспериментально или с помощью микроскопической теории, описывающей структуру приповерхностного переходного слоя [Виноградов, 2002].

Обратим внимание на важное обстоятельство: максвелловские граничные условия не являются следствием интегральной формы уравнений Максвелла. В то же время использование каких-либо граничных условий означает, что тем самым определяется метод измерения полей внутри среды, а заодно и физический смысл полей **E** и **H** [Виноградов, 2002]. Соотношения (9) — (14) и составляют фундамент классической электродинамики материальных сред. При этом решение уравнений Максвелла в материальных средах характеризуется исключительным разнообразием, что обусловлено разнообразием самих сред [Бредов и др., 1985].

Одной из важных задач электродинамики сред — исследование распространения в них плоских монохроматических волн, характеризующихся определенными значениями круговой частоты ω и волнового вектора **k**. Нормальные электромагнитные волны — это все пропорциональные множителю $\exp[i(\mathbf{kr}-\omega t)]$ решения однородных уравнений Максвелла (11) с

$$\mathbf{J}_{ext} = 0\,,\ \rho_{\text{ext}} = 0\,,$$

где

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\mathbf{kr}-\omega t)},\ \mathbf{H} = H_0 e^{i(\mathbf{kr}-\omega t)}\,.$$

Волны такого типа с одним значением ω и **k** могут быть решениями (11) лишь в том случае, если вектор **D**(ω, **k**) связан только с **E**(ω, **k**) при одних и тех же ω и **k**. Это и имеет место в случае справедливости связи

$$D_i\left(\omega,\mathbf{k}\right) = \varepsilon_{ij}\left(\omega,\mathbf{k}\right) E_j\left(\omega,\mathbf{k}\right),$$

т. е. тогда, когда имеется возможность введения тензора $\varepsilon_{ij}(\omega, \mathbf{k})$ [Агранович, Гинзбург, 1979].

Как известно, нормальные волны, которые могут распространяться в рассматриваемой среде, достаточно полно характеризуют ее электромагнитные свойства. Последнее обстоятельство имеет принципиальное значение. Однако в задачах с граничными условиями естественным образом появляются неоднородные волны, когда $\mathbf{k}=\mathbf{k}'+i\mathbf{k}''$. В этом случае направление $\mathbf{k}'$ определяется законом преломления, а $\mathbf{k}''$ направлен по нормали к границе раздела. Но, как оказалось [Агранович, Гинзбург, 1979], использование неоднородных волн, необходимое при решении граничных задач электродинамики, не представляет особый интерес с точки зрения изучения физических свойств самой материальной среды уже на удалении от границы раздела порядка $h<<l$, где l — длина волны в среде [Агранович, Гинзбург, 1979]. Поэтому с этой целью обычно используют только однородные волны с

$$\mathbf{k} = \left(\mathbf{k}' + i\mathbf{k}''\right)\mathbf{S}\,,\ S{=}1.$$

Отметим в этой связи важную методическую деталь. Как известно, геосреда — очень специфический объект исследований. Неоднородности разного ранга составляют саму ее сущность и должны рассматриваться не как отклонение от некоторой нормы, а как сама норма. Но, как тоже известно, в существенно неоднородной среде нет распространяющихся волн рассматриваемого типа — волны являются стоячими [Раутиан, 2008]. Иначе говоря, геометрия волны в данном случае задается особенностями среды — ее проницаемостями $\varepsilon(\omega, \mathbf{r})$, $\mu(\omega, r)$ и проводимостью $\sigma(\omega, \mathbf{r})$. Ясно, что она может быть определена лишь по формулам для решений уравнений Максвелла и тем самым оказывается следствием особенностей исследуемой среды. Однако и такой подход оказывается не всегда приемлемым и адекватным при описании геосреды — активной открытой диссипативной системы, состоящей из множества различных по размерам блоков, перемещающихся как единое целое и взаимодействующих в процессе перемещения. Как известно, принципиально важными свойствами открытых систем является их иерархичность (фрактальность) и волновая природа

[Геншафт, 2009]. При этом роль начального возбуждения играет энергия низов литосферы.

Казалось бы, с тех пор, как неравновесная физика ввела представление о самоподобных диссипативных структурах, отсутствующих в равновесных системах, а геофизика — о геосреде, для которой можно установить пространственно-временную иерархичность состава, структуры и процессов, автоматически должен был появиться интерес к построению некоего теоретического аппарата и соответствующей системы физических представлений для описания электродинамических процессов в ней. Но, к сожалению, здесь геоэлектрика обнаружила внушительные силы инерции, затрудняющие ее интеграцию с геологией и геомеханикой, хотя трудности реализации этой идеи очевидны. В сложноструктурированной геосреде — активной системе — существуют комплексы нелинейных взаимодействий между физическими полями и ее подсистемами. В результате электродинамика такой самоподобной сейсмоэлектромагнитогенерирующей структуры оказывается тесно связанной с ее механикой и флюидодинамикой [Шуман, 2010]. Очевидно, по этой причине в литературе, в основном, используются лишь те или иные подходы для сведения столь сложных систем с самоорганизацией и энергонасыщением к свойствам неких эффективных континуальных сред [Гохберг и др., 1985; Сурков, 2000] или этот вопрос не затрагивается вообще. Тем не менее предельно ясно, что оперирование с эффективными параметрами, в частности показателем преломления, который в ряде случаев представляется ключевым при описании взаимодействия излучения и вещества, обременено риском потерять новые и необычные с точки зрения классического подхода свойства. В этом случае, вероятно, можно говорить лишь о его локальном значении в некоторой определенной точке среды в рамках какой-то аналогии с непрерывной средой. Не удивительно, что такая столь простая конструкция описания геосреды оказывается приемлемой далеко не всегда. Очевидно, в общем случае необходима самосогласованная система уравнений механики, электродинамики, термодинамики, флюидодинамики и учет

структурных свойств геосреды как открытой нелинейной системы.

Как известно, в таких системах могут образоваться уединенные состояния (автоволны), которые можно рассматривать в качестве одного из проявлений самоорганизации. При этом под автоволнами подразумеваются пространственно-локализованные импульсы, распространяющиеся в среде с постоянной скоростью без существенных изменений своей формы [Давыдов и др., 1994; Дмитриевский, Володин, 2008]. Такая система способна формировать различные (в том числе и хаотические) пространственно-временные структуры с разной активностью сейсмоэлектромагнитного излучения. Эти структуры представляют собой импульсы и фронты возбуждения, неустойчивость которых приводит к установлению в геосистеме самоподдерживающихся колебаний с определенной пространственной конфигурацией. В итоге аномалии спонтанного электромагнитного излучения, регистрируемые на земной поверхности, характеризуются упорядоченной пространственной структурой [Богданов и др., 2009в].

Подводя итог сказанному, становится очевидной необходимость смены парадигмального подхода к изучению электродинамики геосреды. При этом, встав на позиции признания геосреды в качестве активной (возбудимой) нелинейной системы, можно понять ряд явлений, не находящих объяснение в рамках классических подходов. Отчетливо видны и трудности на этом пути: достаточно полных моделей геосреды, описываемых конечной системой дифференциальных уравнений, все еще просто не существует. И прежде чем выйти на этот уровень, требуется решить ряд проблем. Очевидно, в первую очередь здесь необходимо выработать язык и систему понятий для рассматриваемой области явлений, установить характеристики геосреды — открытой диссипативной системы, закономерности хаотических движений ее элементов (отдельностей), критерии их возникновений, физических механизмов механоэлектромагнитных преобразований и т. д. Здесь на первый план выходят качественные методы исследования, полевые и вычислительные эксперименты.

Нелинейность как фундаментальное свойство геосреды. Как уже упоминалось, подход, основанный на идеях и принципах нелинейной динамики, является одним из эффективных и перспективных направлений исследований геосистем [Геншафт, 2009; Гуфельд, 2007 и др.]. При этом многообразие причин нелинейности можно попытаться свести к двум типам. В первом из них нелинейность является «врожденной», т. е. следствием внутренних причин, которые отображаются нелинейными уравнениями, описывающими состояние системы. Во втором нелинейность является «привнесенной». Сюда могут быть отнесены системы со значительным энергонасыщением и энерговыделением, высокотемпературные процессы, колебания и волны со значительной амплитудой.

Напомним некоторые определения. Как известно, в физике твердого тела отклонения от линейно-упругого поведения традиционно связывают с проявлением слабого ангармонизма межатомного потенциала [Зайцев и др., 2006]. Считалось, что макроскопические упругие свойства формально определяются разложением внутренней энергии слабодеформируемой среды в степенной ряд по инвариантам тензора деформации. Для описания нелинейности такого типа обычно достаточно к линейному слагаемому в законе Гука добавить квадратичные и кубические компоненты тензора деформации:

$$\sigma = E\left(\varepsilon + \gamma^{(2)}\varepsilon^2 + \gamma^{(3)}\varepsilon^3 + \ldots\right),$$

где σ — упругое напряжение, E — модуль упругости. При этом характерные величины безразмерных квадратичных и кубических коэффициентов нелинейности $\gamma^{(2)}$ и $\gamma^{(3)}$ для однородных аморфных материалов и монокристаллов обычно находятся в диапазоне нескольких единиц, а характерные величины деформаций весьма малы [Зайцев и др., 2006; Руденко, 2006]. При этом нелинейные поправки по сравнению с линейным слагаемым достаточно малы, хотя именно их наличием обусловлены такие явления, как тепловое расширение и зависимость скорости упругих волн от механических напряжений и температуры.

Такую нелинейность принято называть «физической», поскольку она связана с нелинейностью сил межмолекулярного взаимодействия в конденсированной среде [Руденко, 2006].

Второй тип нелинейности определяется нелинейной связью между компонентами тензора деформаций и производными от компонент вектора смещений по координатам. Эта связь, не зависящая от физических свойств деформируемого тела, называется «геометрической» нелинейностью [Руденко, 2006].

Однако еще в 20-е годы прошлого века во многих экспериментах наблюдалось весьма сильное (на 2—4 порядка) возрастание нелинейности. Причины столь больших его значений отличаются от обсуждаемых выше, что и послужило основанием для выделения нелинейности третьего типа — «структурной» [Руденко, 2006].

Столь сильное возрастание акустической нелинейности в большинстве случаев обусловлено наличием в структуре среды компонент с резкоконтрастирующими линейными упругими свойствами. К примеру, в жидкостях этот тип нелинейности возникает при введении сильносжимаемых вкраплений, в частности пузырьков газа. Характерным примером таких «контрастно-мягких» дефектов являются трещины. К этому же классу сред могут быть отнесены гранулированные среды [Есипов и др., 2006]. Существенно, что если нелинейные акустические свойства сплошных сред, таких как монокристаллы или однородные жидкости, определяются особенностями деформации на молекулярном уровне, то соответствующие характеристики гранулированных сред проявляются на мезомасштабном уровне, т. е. на масштабах, определяемых размером гранул, и определяются их структурой [Есипов и др., 2006].

Анализируя многочисленные данные по наблюдениям микроструктурно-обусловленной нелинейности, в работе [Зайцев и др., 2006] сформулировано следующее достаточно общее утверждение: причиной сильного возрастания акустической нелинейности микронеоднородных сред в большинстве случаев является наличие в структуре среды компонент с резко контрастирующими линейными упругими свойствами, причем размер

более мягких включений-дефектов мал по сравнению с длиной упругой волны, а также мала концентрация этих включений.

Как известно, неоднородные среды, в том числе гранулированные, относятся к обширному классу нелинейных сред с акустической дисперсией. При этом сочетание нелинейности и дисперсии позволяет получить для акустических волн в таких средах решения солитонного типа [Даниленко, Микуляк, 2010].

Таким образом, оказывается целесообразным различать три типа нелинейности: физическую, геометрическую и структурную. При этом каждая из них может быть или распределена в объеме среды, или сосредоточена в области пространства, малой по сравнению с длиной волны [Руденко, 2006].

Встав на позиции признания геосреды в качестве открытой нелинейной диссипативной системы, можно понять ряд явлений, в частности генерацию и распространение электромагнитного шума, не находящих отражения в рамках классических подходов [Шуман, 2010]. Как уже упоминалось, для Земли можно установить пространственно-временную иерархичность состава, структуры и процессов [Садовский, 2004; Геншафт, 2009], а практически повсеместная дегазация и дефлюидизация ее недр сопровождается структурно-вещественными преобразованиями на разных глубинах [Дмитриевский, Володин, 2006; Гуфельд, 2007]. В свою очередь, изучение волновых процессов позволило установить нелинейные свойства геосреды, обусловленные разномасштабной структурированностью энергетических потоков [Дмитриевский, Володин, 2006; Гуфельд, 2007]. Эти эндогенные энергетические потоки приводят к формированию зон с избыточной энергией — энергоактивных зон. В такой активной системе (геосреде), как уже упоминалось, существуют комплексы нелинейных взаимодействий как между ее подсистемами, так и между физическими полями. Можно предположить, что природа сейсмоакустической и электромагнитной эмиссий в конечном счете состоит в трансформации ее собственной энергии в различные локально неустойчивые состояния, которые, собственно, и являются источниками эмиссий. Однако для их описания потребуются, очевидно, новые

математические модели нелинейных взаимодействий в системе физических полей с учетом накопленной энергии в геосреде, связей электромагнитными и сейсмоакустическими полями, энергетическими параметрами химического потенциала геосреды и ее флюидонасыщенностью [Дмитриевский, Володин, 2006; Гуфельд, 2007; Геншафт, 2009]. Разумеется, общей теории сред такого типа не существует и каждый достаточно проработанный пример в этой области исследований, как правило, дает примеры новых типов их динамики, самоорганизации сейсмоакустической и электромагнитной эмиссий.

Заключение. Как следует из рассмотренных примеров, намечается интересный набор проблем, решение которых требует более последовательного, нетривиального и нетрадиционного, чем это принято, понимания свойств геосреды. Случайны ли экспериментально установленные закономерности генерации акустосейсмоэлектромагнитного шума, его пространственная дифференциация, особенности и характеристики распространения, наличие доминантных частот и откуда они следуют — вот главная задача данного рассмотрения. Очевидно, в этом аспекте подход, основанный на идеях нелинейной динамики, является одним из важных направлений дальнейших исследований этих явлений. При этом неравновесность, нелинейность, неустойчивость геосреды являются основными принципами, на которых должна строиться теория генерации и распространения сейсмоакустической и электромагнитной эмиссии литосферы. Сложность задачи состоит в том, что необходимо учитывать возможность различного физического содержания процессов генерации шума на разных уровнях геометрически самоподобной блоковой системы, отличительными признаками которой являются необратимые изменения во времени, фрактальность, недетерминированность поведения (бифуркации), волновая и резонансная природа всех процессов, стохастический резонанс, большая роль малых возмущений. Наличие механизмов, трансформирующих энергию колебаний в низкочастотную или высокочастотную области спектра акустосейсмоэлектромагнитного излучения, означает, что регистрируемый

на земной поверхности сигнал несет информацию не только об источниках, но, в значительной степени, и о трассе его распространения (геосреде). Это означает, что эти сигналы могут быть использованы как для диагностики локализованных геоструктур, так и геодинамики среды. Приведенные результаты и многочисленные данные других авторов, посвященные этой проблеме, подтверждают перспективность использования наблюдений за литосферными электромагнитными сигналами для решения задач геодинамики, геологии и геофизики.

Геосреда и сейсмический процесс: проблемы управления

Геофизический журнал, № 2, Т. 33, 2011, С. 16—27.

Введение. В последние годы появилась серия публикаций, посвященных проблеме управления сейсмическим процессом (изменения пространственно-временной структуры сейсмичности) на некоторой территории [Тарасов, 1995, 1999, 2007; Авагимов и др., 2002; Гуфельд, 2005, 2007 и др.]. Деликатность проблемы состоит в том, что если коровые сильные землетрясения пока не удается предсказать, то возможно ли и в какой степени управлять их возникновением и эволюцией, принимая во внимание имеющийся опыт лабораторного и натурного эксперимента. В частности, многочисленные работы посвящены изучению влияния относительно слабых контролируемых (подземные ядерные взрывы, магнитогидродинамические (МГД) генераторы, электроразведочные генераторные устройства (ЭГУ)) и естественных (магнитные бури (МБ)) источников. При этом в качестве критерия силы воздействия принимается соотношение энергии, закачиваемой в лабораторный образец или реальную среду с энергией тепловых флуктуаций kT, где k — постоянная Больцмана, T — температура (при обычных условиях $kT \sim 4 \cdot 10^{21}$ Дж [Гуфельд, 2007]).

Согласно оценкам, выполненным И. Л. Гуфельдом, воздействие, вызываемое контролируемыми и естественными источниками, как правило существенно меньше энергии тепловых флуктуаций. Тогда можно ли на основе имеющегося опыта сейсмического мониторинга говорить о каком-либо регулировании сейсмического процесса? Очевидно, по этой причине, имея ввиду воздействие на среду слабых естественных и контролируемых источников, в большинстве случаев говорится о «триггерном» характере их воздействия на сейсмический процесс, избегая при этом определения или конкретизации «триггерного воздействия». В такой картине, однако, фантазии превалируют над реальностью. Смысл триггерного воздействия в этом случае состоит в попытке изменения объемно-напряженного состояния среды и снятия таким образом накапливаемых в ней напряжений. Но это практически невозможно, если рассматривать процессы в литосфере с позиции классических представлений закрытых равновесных систем, а также если геосреда представляет собой чисто релаксационную систему, в которой нет собственных частот и, как следствие, невозможен и резонанс в классическом его понимании. Список вопросов и претензий такого рода, очевидно, можно продолжить [Гуфельд, 2007]. И все же, несмотря на проблематичность задачи воздействия на геосреду, многие авторы отмечают или указывают на принципиальную возможность внешнего контролируемого влияния на процессы формирования и распада крупномасштабных структур земной коры таким образом, чтобы сильное землетрясение сменилось крипом или «роем» более слабых событий [Гуфельд, 2007]. При этом принципиальное значение приобретает понимание физики регулируемости сейсмического процесса как естественными, так и контролируемыми источниками, отсутствие которого, очевидно, и явилось причиной неудач или противоречивости результатов реальных экспериментов.

По-видимому, неудачи были обусловлены также и отсутствием адекватных представлений о геосреде как открытой диссипативной системе. Как известно, такие системы, будучи

сильно неравновесными, обнаруживают сложное динамическое поведение. При рассмотрении их поведения и в особенности взаимодействия таких систем, как известно, могут быть заимствованы или привлечены в несколько модифицированном виде принципы теории управления [Кадомцев, 1994; Фрадков, 2005]. Согласно работе [Кадомцев, 1994], «…игра нелинейных динамических процессов в таких системах очень часто приводит к самоорганизации, когда и динамическое, и информационное содержание процесса оказываются согласованными с большой точностью…». Примечательно, что малые сигналы, действующие на такие системы, могут приводить к существенным последствиям.

Как известно, при подпитке энергией извне диссипативная система может испытывать устойчивые колебания (устойчивый цикл) в фазовом пространстве или перейти в режим сложного стохастического движения (странного аттрактора). Одним из аттракторов может быть разрушение системы [Фрадков, 2005]. Существенно, что в неустойчивых открытых системах с диссипацией фазовое пространство упрощенно можно представить себе разделенным на области приближения к различным аттракторам и для перевода системы из одного аттрактора на другой ее необходимо перебросить из одной области притяжения в другую. При этом важна не величина силового воздействия на систему, а его информационная характеристика. Иначе говоря, в таких системах малыми управляющими сигналами можно сильно изменить траекторию ее поведения [Кадомцев, 1994].

Очевидно, все эти вопросы, актуальные для современной геофизики, требуют конкретизации и дальнейшего исследования. По-видимому, проблема воздействия контролируемыми и естественными относительно слабыми источниками на сейсмический процесс с этих позиций не рассматривалась и не анализировалась. Основная цель данной работы — привлечь внимание специалистов к этой быстро развивающейся области исследований, иллюстрируя изложение некоторыми частными известными примерами.

Геосреда как открытая диссипативная система. Как известно, геосреда — очень специфический объект исследований. К фундаментальным свойствам относится ее строение: она состоит из множества различных по размерам блоков, перемещающихся как единое целое и взаимодействующих в процессе перемещения; она существует и эволюционирует в пространстве и во времени в больших интервалах значений, чем в любых лабораторных экспериментах. Неравновесность, нелинейность, неустойчивость реальной среды — вот те основные исходные позиции, на которых должна строиться геофизическая теория и которые не находят отражения в классических вариантах ее описания [Садовский, 2004; Гуфельд, 2007; Стаховский, 2007; Геншафт, 2009 и др.]. Она не может рассматриваться как континуум — ей присуща внутренняя самоподобная структура, для которой нет места для какой-либо области с характерными размерами и границами, как не существует и какого-либо характерного масштаба.

Очевидно, что в рамках таких представлений природная среда, стремящаяся к самоорганизации, нуждается в новых моделях описания, которые бы позволили анализировать диссипацию поступающей в нее из земных недр энергии, релаксацию локальных напряжений, стационарные режимы деформирования, вопросы генерации сейсмоэлектромагнитных возмущений и их распространения. Напомним, что самоорганизация среды выражается в появлении в ней масштабно-инвариантной структуры, вызванной неравновесным состоянием земной коры под непрерывным воздействием тектонических напряжений [Садовский, 2004; Гуфельд, 2007; Геншафт, 2009].

Далее, геосреда — это открытая (с притоком энергии извне) нелинейная (в общем случае обладающая тремя типами нелинейности — физической, «геометрической» и структурной [Зайцев и др., 2006; Руденко, 2006]) диссипативная система. Ее отличительные признаки — необратимые изменения во времени, фрактальность, недетерминированность поведения после прохождения критической точки (бифуркации), волновая (автоволновая) и резонансная природа протекающих в ней про-

цессов, большая (иногда и определяющая) роль малых возмущений [Гуфельд, 2007].

Как известно, эволюция нелинейных систем может осуществляться разными путями. На смену однозначности приходит множественность путей развития, многообразие поведения ее объектов, а ограниченная точность в описании системы имеет принципиальное значение. При этом неустойчивость и пороговый характер самоорганизации (установления хаотического порядка) описываются нелинейными уравнениями.

Заметим, что имеются весомые основания предположить: ряд важных нерешенных геолого-геофизических проблем концентрируется в области быстрых изменений параметров геосреды [Гуфельд, 2007; Кисин, 2008]. При этом основным действующим фактором планетарного масштаба, определяющим и поддерживающим текущую нестабильность геосреды в состоянии, близком к критическому, могут быть процессы непрерывного взаимодействия восходящих потоков легких газов (водород, гелий и др.) с твердой фазой литосферы, при которых меняются объемы ее составных элементов, что и приводит к несинхронным вариациям объемно-напряженного состояния во внутриблоковых и граничных структурах [Гуфельд, 2007; Дмитриевский, 2008].

Представления о критических явлениях в открытых нелинейных системах позволяют с иных позиций подойти к проблеме прогноза сейсмической активности (землетрясений) [Лукк и др., 1996; Гуфельд, 2007; Геншафт, 2009 и др.]. В частности, в работе [Дещерский и др., 2003] обосновывается возможность извлечения прогнозной информации о динамике эндогенных процессов из хаотических высокочастотных вариаций геофизических параметров (парадигма нестационарных флуктуаций геофизических полей), а авторы работы [Соболев, Пономарева, 2003] вплотную подошли к трактовке тектонического процесса и развития очага землетрясения как о детерминированном хаосе, приводящем к самоорганизации.

Получила известность концепция самоорганизации статистических систем в критическом состоянии (Self-Organized Criti-

cality SOC) [Bak, Tang 1989], а в качестве ее обобщения — математическая модель самоподобной сейсмогенерирующей структуры земной коры, основанная на идее согласования скайлингов трех мультифрактальных полей — разломного, сейсмического и сейсмоэнергетического [Стаховский, 2007].

Как обобщение работ этого направления можно рассматривать предложенную И. Л. Гуфельдом концепцию динамически неустойчивой геосреды, на основе которой анализируется проблема управления сейсмическим процессом [Гуфельд, 2007]. Рассмотрению некоторых аспектов этой проблемы и посвятим дальнейшее изложение.

Об управлении в физических системах. Приведем некоторые известные положения, относящиеся к моделям динамики физических систем. Как отмечается в работе [Фрадков, 2005], в последние годы произошел бурный рост числа публикаций, посвященных вопросам управления в физических системах или, в более широком плане, применению кибернетических подходов в физике. Согласно современной точке зрения, кибернетика понимается как теория управления в широком смысле и к кибернетическим методам относят не только методы управления, но и методы оценивания переменных и параметров систем, методы фильтрации, распознавания образов и т. д. [Кадомцев, 1994; Фрадков, 2005]. При этом во многих работах, хотя и отмечалась ключевая роль нелинейности системы, аппарат современной теории нелинейного управления использовался весьма недостаточно.

По мнению А. Л. Фрадкова это обусловлено тем, что возникающие задачи управления в физических системах, вообще говоря, существенно отличаются от традиционных задач автоматического управления. Так, вместо классической задачи управления — приведение траектории рассматриваемой системы в заданную точку (задача регулирования) и приближения траектории к заданному движению (задача слежения), ставятся ослабленные цели, а именно создание режимов с частично заданными свойствами, качественного изменения фазового порт-

рета системы или синхронизации хаотических колебаний. Кроме того, требуется «малость» управляющего воздействия.

Ситуация в этой области исследований, согласно работе [Фрадков, 2005], стала достаточно быстро изменяться после выхода в свет статьи [Ott et al., 1990] «Управление хаосом», в которой сделан вывод о том, что даже малое управление в виде обратной связи, приложенное к нелинейной (в частности, хаотически колеблющейся) системе, может существенно изменить ее динамику и свойства и, к примеру, превратить хаотическое поведение в периодическое.

Согласно работе [Кадомцев, 1994], хаотическое поведение свойственно большей части динамических систем как консервативных (с сохранением энергии), так и диссипативных. Близкие траектории хаотического движения разбегаются в фазовом пространстве: оно локально неустойчиво. Однако в системах с диссипацией в процессе движения фазовый объем сокращается и в простейшем случае такая система эволюционирует к состоянию равновесия. При подпитке энергией извне диссипативная система может испытывать устойчивые колебания или перейти в режим стохастического движения, которое получило название странного аттрактора. Как оказалось, все траектории диссипативной системы в фазовом пространстве соответствуют аттракторам: равновесию, периодическим колебаниям или странному аттрактору. Одним из аттракторов может быть разрушение рассматриваемой системы.

Если система неустойчива, то все траектории в фазовом пространстве разбегаются и здесь критически важное значение приобретают начальные данные: если поставить задачу, чтобы траектория реального движения была близка к выбранной или предпочтительной (т. е. чтобы она попала в некоторую заданную область фазового пространства), начальные данные должны быть заданы с необходимой точностью. Принципиально важным является то обстоятельство, что малое смещение в фазовом пространстве может привести к нужной траектории, однако необходимо точно знать, куда смещаться [Кадомцев, 1994].

Как уже упоминалось, у открытых систем с диссипацией фазовое пространство в первом приближении можно представить разделенным на области притяжения к различным аттракторам и для перевода системы с одного аттрактора на другой перевести ее из одной области притяжения к другой. Иначе говоря, внешнее воздействие должно перевести систему в любую точку притяжения другого аттрактора. При этом следует сообщить определенное количество информации: $\ln(v/\Delta v)$, где v — полный объем фазового пространства, Δv — объем притяжения второго аттрактора.

Очевидно, для реализации этого переброса требуется затратить определенное количество энергии. При этом, возможно, «…существует некое минимальное значение энергии, ниже которого такой перенос невозможен и соответствующий сигнал не реализует имеющуюся информацию» [Кадомцев, 1994]. Разумеется, здесь оказывается важным не только количество информации, но и ее содержание, т. е. указание, в какой конкретно аттрактор система переводится.

Существенно, что при переходе к поведению все более сложных систем именно структурные, информационные аспекты их поведения и развития выступают на первый план, в тот время как динамика создает лишь основу для информационного развития. Поэтому во многих работах по управлению хаотическими режимами не предполагается задания количественных характеристик желаемого движения, а задается лишь желаемый качественный тип аттрактора. В качестве дополнительного ограничения может выступать требование обеспечить достижение этой цели при маломощном, малозатратном воздействии. При этом говорят об управляемости системы, если при вариации входного параметра в области допустимых (или реализуемых) значений область изменения выходного параметра (характеристик поведения) охватывает значения, соответствующие желаемым режимам функционирования системы [Фрадков, 1994].

Итак, в неустойчивых системах малыми сигналами можно сильно изменить траекторию, причем для этих управляющих

сигналов важна не их величина, а точное соответствие возможности перевода исходной траектории развития на необходимую.

Экспериментальные результаты по изменению естественного режима сейсмического процесса. До настоящего времени предметом широких дискуссий все еще остаются два важных вопроса.

Во-первых, можно ли, опираясь на нынешний опыт и возможности мониторинга сейсмического процесса, говорить о воздействии на его параметры контролируемых источников. Во-вторых, насколько обеспечен информационный аспект этой проблемы, т. е. имеем ли мы по результатам современного мониторинга правильную информацию о структуре фазового пространства геосистемы конкретного региона?

Сложность проблемы состоит также в том, что при экспериментальных попытках изменения сейсмического режима можно рассчитывать на действие относительно слабых контролируемых искусственных (подземные ядерные взрывы, магнитогидродинамические генераторы, электроразведочные генераторные устройства, инжекции малого по сравнению с эффективным объемом среды количества воды в трещины) или естественных (магнитные бури) источников, имея в виду то обстоятельство, что уменьшить заметным образом постоянно поддерживаемую за счет энергии недр предельную энергонасыщенность среды практически невозможно. Но прежде чем переходить к рассмотрению этих вопросов, отметим некоторые установленные экспериментально особенности сейсмического процесса.

Эксперимент свидетельствует о наличии для наиболее крупных регионов по крайней мере двух компонент сейсмической активности (Т- и М-компонент) [Гарькавый и др., 1994; Фридман и др., 2010]:

– глобальной (медленно меняющейся) Т-компоненты (от анг. Total — глобальный), являющейся общей для двух полушарий и отражающей временные изменения сейсмической активности всего земного шара;

– зеркально-симметричной (быстро меняющейся) M-компоненты (от англ. Mirror — зеркальный) для Северного и Южного полушарий, которая в относительно спокойный период проявляет отчетливую зеркальную симметрию — когда в Северном полушарии спад активности, в южном подъем и наоборот.

Наиболее отчетливо T-компонента проявляется для самых сильных (магнитуда $M \geq 5{,}5$) сейсмических событий, M-компонента лучше всего видна при анализе всего спектра событий ($M \geq 4{,}0$), в котором доминируют слабые события. Однако в годы высокой сейсмической активности корреляция M-компонент может быть и положительной [Фридман и др., 2010].

Следовательно, можно предположить существование по крайней мере двух классов динамических факторов, определяющих изменение сейсмичности крупных тектонических структур, а именно глобального (T-компонента), контролирующего изменения во времени общего числа сильных землетрясений и механизма, обуславливающего M-компоненту, влияющего только на относительно слабые события в достаточно крупных регионах земного шара.

Наиболее примечательный экспериментальный факт — обнаружение «спокойного» периода сейсмической активности, связанного со временем проведения подземных ядерных испытаний в США и СССР: во время проведения полномасштабной программы подземных ядерных испытаний (1966—1988 гг.) землетрясения с магнитудой $M \geq 8{,}3$ на земном шаре полностью отсутствовали (см. [Фридман и др., 2010, рис. 16]). Следовательно, в этом смысле можно говорить об изменении характера глобальной сейсмической активности Земли. Однако реакцию геосреды на действие контролируемых и естественных источников обычно связывают с активизацией режима слабой сейсмичности. При этом предполагается, что она ведет к разрядке упругих напряжений в больших объемах геосреды и, соответственно, к уменьшению энергии возможного сильного события [Тарасов и др., 1999; Гуфельд, 2007; Тарасов, 2007].

Примечательно, что в отличие от ядерных подземных взрывов на Семипалатинском полигоне относительно слабые взры-

вы химических взрывчатых веществ мощностью около 400 кг (276 взрывов в Гармском районе Таджикистана, проведенных в 1979—1984 гг.) не вызывали заметных изменений сейсмичности.

Остановимся теперь на некоторых результатах воздействия на геореду пусков МГД-генератора, электроразведочного генератора и магнитных бурь, приведенных в работах [Закржевская, Соболев, 2002; Тарасов, 2007; Гуфельд, 2007]. Они достаточно неоднозначны. В частности, в работе [Тарасов, 2007] утверждается, что воздействие электромагнитных, импульсных возмущений, излучаемых МГД-генератором, приводит к существенной перестройке пространственно-временных свойств, сейсмического процесса сейсмоактивных зон, повышению устойчивости пространственного распределения сейсмичности во времени и одновременно ускоряет циклы ее перестройки. При этом обнаруживаются зоны, в которых при воздействии на среду МГД-генератора и магнитных бурь слабая сейсмичность возрастала, уменьшалась или не изменялась вообще. В частности, в работе [Соболев и др., 2001] отмечена знакопеременная динамика реакции геосреды в одних и тех же регионах, т. е. активизация сменялась затишьем и наоборот. В то же время для других регионов отмечался только положительный эффект.

Установлена задержка реакции геосреды на воздействие импульса МГД-генератора от 2 до 7 сут, а при воздействии электроразведочным генераторным устройством — до 17 сут [Гуфельд, 2007; Тарасов, 2007].

Однако физический механизм инициирования сейсмичности электромагнитными импульсами в настоящее время остается неясным. Как уже упоминалось, в ряде работ указывается на триггерный характер их влияния на сейсмический процесс, хотя четкого определения триггерного эффекта не приводится.

Согласно работе [Гуфельд, 2007], смысл триггерного воздействия состоит в изменении объемно-напряженного состояния среды под влиянием слабых внешних воздействий.

И. Л. Гуфельд утверждает, что эти источники «…не могут оказывать прямого действия на крупномасштабные структуры

разрушения в литосфере …». В то же время их действие возможно на локальные структуры, находящиеся в неравновесном состоянии в данный конкретный момент времени.

В рамках предложенной им физико-химической модели сейсмотектонического процесса этого можно достичь путем воздействия контролируемыми или естественными источниками на пространственно-связанную блочную структуру, влияя на параметры восходящих потоков легких газов, ускоряя таким образом естественный процесс разблокировки границ, не допуская в результате появления крупномасштабных связанных структур. При этом методология воздействий должна учитывать нелинейные свойства среды, ритмичность воздействий и процессов дегазации, пространственный масштаб зоны эндогенного возбуждения литосферы. Главное в этом процессе — за счет искусственных воздействий уменьшить площадь пространственно-связанной блочной структуры и тем самым восстановить режим фонового движения блоков [Гуфельд, 2007].

В заключение раздела следует упомянуть о воздействии на геосреду путем изменения уровня воды водохранилищ и возбуждением «вибраций», обусловленных энергией сбрасываемых вод. В частности, заполнение водохранилища Нурекской ГЭС вело к более упорядоченному высвобождению сейсмической энергии, к ее общему уменьшению, а число относительно слабых землетрясений увеличивалось почти вдвое [Гуфельд, 2007].

В работе [Соболев и др., 2006] показано, что сейсмичность в прилегающей к оз. Байкал зоне зависит от сезонных вариаций уровня озера, которые меняют поровое давление в диапазоне миллибар. При этом физический механизм изменения сейсмичности связывается главным образом с повышением внутрипорового давления и, соответственно, уменьшением эффективного давления пород в рамках модифицированного закона Кулона—Мора, а также эффектом смачивания водой стенок трещин. И далее делается (с учетом экспериментов на образцах) главный вывод: инжекция небольшого (0,01 %) по сравнению с объемом исследуемой модели количества воды в трещинах приводит к резкому усилению акустической эмиссии.

Разумеется, однако, эти лабораторные результаты вряд ли могут служить убедительным доказательством возможности регулирования сейсмического процесса, так как совершенно ясно, что рассматриваемые лабораторные образцы и условия их нагружения не могут моделировать реальную геосреду — динамически неустойчивую открытую нелинейную систему.

Особенности и механизмы воздействия МГД-генератора, ЭГУ и МБ на сейсмический процесс. Как уже отмечалось, трудности в интерпретации экспериментальных данных по воздействию указанных источников на активизацию сейсмичности очевидно обусловлены отсутствием адекватных представлений о геосреде, механизмах механоэлектромагнитных преобразований, трудностями понимания причин быстрой изменчивости различных параметров геосреды. Трудности возрастают за счет эпизодичности и несистематичности эксперимента, отсутствия понимания динамического и информационного аспектов поведения сложных физических систем со стохастичностью, когда нелинейность ведет к бифуркации, т. е. выбору пути ее эволюции, а малое внешнее воздействие может приводить к сильному изменению траектории поведения геосистемы в фазовом пространстве.

Предпримем попытку анализа проблемы регулирования сейсмического процесса, исходя из позиции признания геосреды в качестве открытой нелинейной диссипативной системы. Будем считать установленным то, что геосреда эволюционирует по законам и критериям, присущим такого рода системам [Геншафт, 2009].

Каждая ее подсистема и элементы имеют свои энергетические параметры, меняющиеся во времени под воздействием нестационарного эндогенного энергетического потока. Энергетическая накачка геосреды способствует формированию активных систем и элементов, характеризующихся нелинейной динамикой совокупности физических полей и автоволновыми механизмами переноса. В частности, при определенной концентрации флюида возникает неустойчивость ее структурных элементов и происходит усиление процессов разрушения, что в

конечном счете и приводит к активизации излучения из этих областей акустических и электромагнитных возмущений, отражающих нелинейную флюидодинамику процесса [Дмитриевский, Володин, 2006, 2008; Гуфельд, 2007]. В итоге, воздействуя на динамику восходящих газовых потоков, следствием взаимодействия которых с твердой фазой литосферы являются вариации объемов элементов геосреды и нарушение их аккомодации между собой и блоками, в принципе возможно достижение регулируемости сейсмического процесса. При этом, согласно И. Л. Гуфельду, нет необходимости воздействия на всю пространственно-связанную блочную структуру. Главное при этом — это восстановление режима фоновых движений блоков.

Существенно, что в этом случае не предполагается задания каких-либо количественных характеристик их движения. Вместо этого предусматривается лишь желаемый качественный тип предельного множества (аттрактора).

Особый интерес представляют оценки возможности преобразования энергии геосистемы при заданных уровнях управления и диссипации. Определяющее значение при этом имеет характеристика, описывающая степень возрастания энергии системы вследствие управления, определяющая меру возбудимости геосистемы, получившая название «индекса возбудимости» [Фрадков, 2005].

Индекс возбудимости может быть определен экспериментально подобно обычной частотной характеристике линейной системы: при измерении характеристики возбудимости изменяется амплитуда (уровень) входного сигнала [Фрадков, 2005].

Понятно, что в этом случае мы воспользовались ослабленной постановкой задачи управления, более естественной с точки зрения геосистем: найти управляющую функцию с минимальной нормой, обеспечивающую перевод системы из аттрактора разрушения в любую точку притяжения другого аттрактора (на другую траекторию развития).

Уравнение генерации спонтанного электромагнитного излучения и задача управления. Как известно, общепринятым описанием возникновения и эволюции пространственно-вре-

менных структур в возбудимых (активных) средах являются многокомпонентные системы уравнений типа «реакция—диффузия» [Давыдов и др., 1994; Шмидт, 2007]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\alpha(u) \frac{\partial}{\partial x} u \right) + F(u), \qquad (1)$$

где $\alpha(u)$ — коэффициент диффузии.

С учетом данного обстоятельства и принимая во внимание множественность механизмов механоэлектромагнитных преобразований и соответственно генерации электромагнитных возмущений в очень широком диапазоне частот [Сурков, 2000; Гульельми, 2007, 2008; Шуман, 2008б, 2010в], в работе [Шуман, 2008б] предложено обобщенное нелинейное уравнение генерации переменного магнитного поля **B**:

$$\frac{\partial B_i}{\partial t} = \alpha_{ij} \nabla^2 B_j + F_i(\mathbf{B}), \qquad (2)$$

где $B_i(r, t)$ — индукция, функция пространственных переменных $r \in D \subset R^n$ и времени t; $\nabla^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial^2}{\partial r_i}$ — оператор Лапласа, задающий диффузионный тип затухания процесса; α_{ij} — матрица диффузии; $F_i(\mathbf{B})$ — нелинейная функция, определяемая динамичностью процессов взаимодействия геосреды с восходящими потоками легких газов и экзотермических реакций и в конечном счете разнообразием механизмов механоэлектромагнитных преобразований, протекающих в некотором объеме геосреды. При этом характеристики электромагнитных возмущений (импульсов или автоволн) определяются параметрами геосреды.

Как свидетельствует имеющийся опыт описания активных сред, основные закономерности образования автоволновых структур могут быть воспроизведены уже в рамках двухтрехкомпонентной системы [Давыдов и др., 1991], которую, с учетом равенства (2), в простейшем случае можно записать в форме

$$\frac{\partial B_i}{\partial t} = \alpha_{ij}\nabla^2 B_j + F_i(\mathbf{B},\mathbf{G}),\ \frac{\partial G_i}{\partial t} = \beta_{ij}\nabla^2 G_j + \varepsilon P_i(\mathbf{B},\mathbf{G}), \qquad (3)$$

где функция **G** определяет интенсивность динамических источников в геосреде.

Функция P_i(**B**, **G**), в принципе, может быть монотонной или даже линейной [Давыдов и др., 1991], в то время, как функция F_i(**B**, **G**) обычно задается полиномами или кусочно-линейными функциями — случай, когда ε=0 соответствует однокомпонентной системе.

Уравнения (3) представляют собой достаточно сложную систему нелинейных уравнений в частных производных второго порядка. Обзор возможных подходов и методов ее решения, а также анализ особенностей этой системы приведен в работе [Цифра, Шуман, 2010]. В частности, с целью упрощения анализа уравнения (2) в этой работе предлагается использовать его симметрию. Симметрийный метод позволяет свести это уравнение или систему (3) в частных производных параболического типа к изучению системы обыкновенных дифференциальных уравнений. С этой целью может быть использован как классический теоретико-групповой подход, так и его обобщение — метод условной инвариантности. Некоторые примеры, конкретизирующие вид функции **F**(**B**), приведены в работах [Гульельми, 2007; Шуман, 2010в].

Как известно, уравнения (2), (3), в принципе, дают описание сложных режимов генерации и распространения электромагнитных возмущений в рамках рассматриваемой модели геосреды. Идея состоит в том, чтобы на его основе попытаться сформулировать задачу управления рассматриваемой системы (геосреды).

Как известно [Фрадков, 2005], для синтеза управления в пространственно-распределенных системах модели управления объекта могут быть получены либо путем дискретизации по пространству распределенных моделей, описываемых уравнениями в частных производных, либо как набор обычных диф-

ференциальных уравнений, описывающих отдельные пространственные элементы (ячейки).

При дискретизации уравнения (2) по пространству множество D заменяется конечным числом точек-узлов r_k, k=1, 2…N, каждому из которых соответствует переменная состояния $\mathbf{B}_k(t)$. При этом динамика величин $\mathbf{B}_k(t)$ определяется как собственной динамикой $\mathbf{F}(\mathbf{B}_k)$, так и взаимосвязями с соседними узлами.

К специфическим целям управления, очевидно, следует отнести изменение исходной траектории в фазовом пространстве рассматриваемой системы на нужную. И здесь отчетливо просматриваются трудности решения этой задачи.

Во-первых, необходимо иметь необходимую информацию о структуре фазового портрета системы. Во-вторых, динамика $\mathbf{F}(\mathbf{B}_k)$ определяется как распределением напряжений в геосреде, так и коэффициентами механоэлектромагнитных трансформаций, определяемых свойствами слагаемых ее горных пород и всей пространственно-связанной блочной структуры. При этом соответствующие параметры могут изменяться в широких пределах и, как правило, не поддаются непосредственному измерению. Попытки же использования некоторых эффективных их значений затруднительны, так как требуется их значение для каждого конкретного региона, где выполняются измерения и предпринимаются попытки управления.

Таким образом, главная проблема при попытке управления в геосистеме — это трудности, связанные с измерением состояния системы и реализацией управляющего воздействия на относительно коротких промежутках времени. Данное обстоятельство вызывает определенное беспокойство, поскольку вопрос управления сейсмичностью становится достаточно актуальным. По существу здесь мы имеем дело с наиболее сложным случаем «черного ящика», при котором информация о структуре модели фактически отсутствует.

Эффект стохастического резонанса и управление распределенными системами. Как уже отмечалось, в неустойчивых системах малыми сигналами можно сильно изменить траекторию развития. Однако для выхода на нужную необходимо

иметь довольно подробную информацию о ее структуре. Далее, чтобы реально осуществить переход системы с одного аттрактора на другой требуется затратить некоторое количество энергии и, вполне возможно, существует некоторое ее минимальное значение, ниже которого этот переход невозможен и соответствующий сигнал не может реализовать переход на новую траекторию. Возникает вопрос: есть ли реальные возможности понижения этого порога, если к геосреде подходить как к чисто релаксационной системе, в которой нет собственных частот и, как следствие, невозможен резонанс в классическом его понимании?

Очевидно, можно дать на него положительный ответ: вероятность успеха можно повысить, если воспользоваться явлением, представляемым традиционно как «стохастический резонанс». Смысл этого названия состоит в том, что отклик системы на суммарное воздействие управляющего сигнала и шума в системе не монотонно зависит от интенсивности шума.

Как известно [Климентович, 1999; Анищенко и др., 1999], эффект стохастического резонанса определяет группу явлений, при которых отклик нелинейной системы на слабый внешний сигнал заметно усиливается с ростом интенсивности шума в системе. Этот эффект представляет собой фундаментальное физическое явление, типичное для нелинейных систем. Иначе говоря, шум может выступать в роли конструктивного фактора, вызывающего рост степени когерентности или степени порядка в системе.

В частности, установлено, что наличие источников шума (приливы, метеофакторы, неравномерность вращения Земли и др.) в нелинейных динамических системах может индуцировать принципиально новые режимы их функционирования, которые не могут быть реализованы в отсутствие шума. При этом шумовой сигнал может быть близким по своим статистическим свойствам белому, коричневому или фликкер-шуму (шуму мерцания).

Таким образом, идея состоит в том, чтобы с помощью шума в геосистеме контролировать эффективность и степень влияния источника (МГД-генератора) на геосреду с целью измене-

ния траектории ее развития. Во всяком случае, можно думать, что это обстоятельство во многом определяет и объясняет неопределенность экспериментальных данных и отсутствие убедительных доказательств воздействия МГД-генератора, ЭГУ или МБ на сейсмический процесс из-за случайного, несистематического характера постановки экспериментов, никак не связанных с характером шумовой компоненты в геосреде в момент его проведения. Разумеется, видны и трудности реализации этой идеи. После сделанных замечаний представляется уместным снова вернуться к проблеме регулирования сейсмического процесса.

Как уже отмечалось, сейсмический процесс реализуется в предельно энергонасыщенной геосреде, испытывающей непрерывное воздействие слабых внешних полей различной природы [Садовский, Писаренко, 1991; Садовский, 2004; Гуфельд, 2007; Стаховский, 2007; Геншафт, 2009]. Однако вопрос о физических механизмах влияния полей естественных и контролируемых источников на сейсмичность все еще недостаточно ясный. Весьма вероятно, что на современном уровне знаний о процессах в геосреде пока невозможно дать исчерпывающее изложение этой стороны проблемы. Из работ этого направления следует по крайней мере три обстоятельства, нуждающиеся в объяснении.

Во-первых, это, конечно, вопрос о том, каким образом энергия электромагнитного импульса контролируемого (МГД-генератор, ЭГУ) или естественного (МБ) источника воздействует на изменение сейсмического режима. Во-вторых, чем вызвана временная задержка их влияния на сейсмичность в пределах 2—7 сут после начала воздействия [Закржевская, Соболев, 2002; Тарасов, 2007; Гуфельд, 2007]. В-третьих, чем обусловлено возрастание суммарной сейсмической энергии ΔE после пусков МГД-генератора, превышающее на 5—6 порядков энергию, отдаваемую МГД-генератором в заземленный диполь [Закржевская, Соболев, 2002; Тарасов, 2007]. И вообще, случайны ли эти закономерности и откуда они взялись. Попытки объяснения трансформации электромагнитных возмущений в механиче-

ские, основанные на классических представлениях о прямом воздействии электромагнитного импульса на мозаику электрических зарядов на бортах микротрещин, в свою очередь влияющую на механику процесса, или привлечением обратного сейсмоэлектрического эффекта второго рода, который напрямую устанавливает связь между величиной переменного электрического поля в среде и механическими колебаниями среды, не дали результатов из-за малости коэффициента электромеханической связи. Кроме того, помимо малости коэффициента электромеханической связи, исходя из этих представлений, крайне проблематично объяснить наблюдаемую в эксперименте упомянутую выше задержку в 2—7 сут.

Что касается последнего третьего замечания, то в ряде работ высказана идея о триггерном характере воздействия МГД-генератора или магнитной бури на характер сейсмичности [Уруцков, 2000; Закржевская, Соболев, 2002] или об инициировании высвобождения энергии, уже накопленной в геосреде в результате иных процессов [Тарасов, 2007]. Но при этом мы снова возвращаемся к первому пункту, а именно: каков механизм этой инициации?

Как уже отмечалось, определенный прогресс в объяснении этого круга проблем достигнут в последнее время в рамках концепции динамически неустойчивой геосреды (физико-химической модели сейсмотектонического процесса), в основу которой положены представления о реакции блочно-иерархической геосреды на взаимодействие с потоками легких газов и экзотермических реакций водорода с другими газами [Гуфельд, 2007].

В соответствии с этой концепцией именно восходящие потоки легких газов могут быть основным переменным фактором, контролирующим текущую неустойчивость литосферы и стимулирующим обмен энергией между отдельными элементами (блоками или их системами) среды.

Существенно, что именно на кинетику восходящих потоков легких газов могут оказывать влияние весьма слабые источники электромагнитных полей и механических вибраций. При этом уровень (порог) управления геосистемой может быть достаточ-

но низким, вполне достижимым при постановке соответствующих экспериментов. С эффектами, обусловленными процессами дегазации, могут быть связаны также инкубационные периоды проявления акустической эмиссии и процессов перестройки объемно-напряженного состояния геосреды и сейсмического процесса [Гуфельд, 2007].

Разумеется, при этом воздействие контролируемых источников должно быть согласованным с проявлением естественных (приливы, метеофакторы, отдаленная сейсмичность, изменения угловой скорости Земли).

Задача управления и мониторинг. Очевидно, главная проблема при синтезе управления геосредой — это трудности с измерением ее состояния и реализацией управляющего воздействия (к примеру, пуска МГД-генератора) в нужные моменты времени или на нужных временных интервалах в условиях, когда прогноз времени ожидания сейсмических событий, как правило, отсутствует, а информация о структуре геосреды крайне ограничена и фрагментарна. Понятно, что классические принципы управления — приведения траектории системы в заданную точку или приближения траектории к заданному движению применительно к геосистеме — нуждаются в серьезной модификации. Возможно, это постановка ослабленных целей, а именно создание режимов с частично заданными свойствами.

Более адекватным в такой ситуации представляется ориентация на использование данных мониторинга. Как известно, целью мониторинга является либо непосредственный прогноз исследуемых характеристик процесса на некоторый временной интервал вперед, либо выделение интервалов времени «аномального поведения», которое в ряде случаев может служить предвестником резких или катастрофических изменений в будущем [Дещерский и др., 2003; Любушин, 2007].

Перспективными в этом плане выглядят следующие направления исследований:

– методы, основанные на идеях отслеживания параметров, характеризующих самоподобные свойства изучаемых сигналов и их изменение во времени;

– методы изучения временных изменений статистической структуры динамических процессов в геосреде;

– поиск сигналов синхронизации, согласованности вариаций наблюдаемых параметров, относящихся к состоянию изучаемого объекта земной коры измеряемых на пространственной сети системы мониторинга или измеряемых в совмещенном пункте различных физических величин. Весьма вероятно, что такой подход к оценке геодинамических свойств и характеристик локальных участков земной коры позволит строить диагностику ее состояния и, очевидно, более обоснованно, а скорее реалистично, подойти к проблеме управления сейсмическим процессом в сейсмогенерирующей геосреде или, возможно, оценить реальность этой проблемы.

Заключение. Идеи о самоподобной эволюции материала земной коры в условиях неравновесного состояния, представления о геосреде, как открытой нелинейной диссипативной системе, в принципе, позволяют привлечь аппарат современной нелинейной теории управления сложных физических систем [Кадомцев, 1994; Фрадков, 2005]. При этом следует подчеркнуть ключевую роль нелинейности в рассматриваемой системе (геосреде). Однако вместо классических целей управления — приведение траектории системы в заданную точку (задача регулирования) или приближения траектории к заданному движению (задача слежения) по отношению к геосреде ставятся значительно более ослабленные цели, а именно — создание режимов с частично заданными свойствами (за счет контролируемых искусственных воздействий уменьшить площадь пространственно-связанной блочной структуры и тем самым восстановить режим фонового движения блоков) [Гуфельд, 2007] или качественного изменения фазового портрета системы (перевод системы с одной траектории развития на другую или переброс системы с одного аттрактора (области притяжения) на другой).

Разумеется, речь при этом идет об открытых системах, через которые могут протекать большие энергетические потоки. В таких предельно энергонасыщенных системах, как известно, сигналами малой мощности можно сильно изменить траекто-

рию поведения. Важно, что в рамках изложенных представлений отпадает необходимость контролируемого воздействия на всю пространственно-связанную блочную структуру геосреды. Главное здесь — за счет локальных воздействий восстановить режим фонового движения блоков [Гуфельд, 2007].

Именно понимание регулируемости сейсмического процесса и сам процесс понимания дают ключ к постановке экспериментальных работ по управлению сейсмическим режимом.

К сожалению, однако, мы никогда не можем быть уверенными в том, что не пренебрегли чем-то весьма существенным. В этом контексте кажется актуальным совместный анализ данных, полученных в результате исследования различных природных процессов (систем мониторинга), ориентированных на прогноз изучаемых характеристик на некоторый отрезок времени вперед, либо выделение времени «аномального поведения» системы, которое может служить предвестником быстрых или даже катастрофических изменений в системе.

Наиболее существенный вывод, вытекающий из приведенных здесь соображений, — это возможность воздействия на параметры сейсмического процесса. Отчетливо видны и трудности реализации этой идеи, связанные с оценкой реакции геосреды на действие контролируемых источников геофизических полей.

Напомним в этой связи, что образование пространственно-связанной структуры блоков в значительной степени зависит от интенсивности и скорости процессов дегазации и уровня внешних полей в данный период времени.

Возможно, многие читатели не согласятся со многими или с какой-то частью приведенных в работе рассуждений, но если у них возникнет желание разобраться или уделить внимание затронутым в статье вопросам и выработать по ним собственные представления, ее цель будет достигнута.

Геосреда как нелинейная диссипативная динамическая система — задачи идентификации, возможности управления, прогноз эволюции (обзор)

Геофизический журнал,
№ 5, Т. 33, 2011, С. 35—50.

Введение. Характерная черта последнего десятилетия — активное проникновение методов нелинейной динамики в геофизическую науку. Несмотря на то, что динамическая система является математической абстракцией, динамический подход оказался весьма полезным инструментом при описании многих процессов, протекающих в твердой Земле. В частности, как обобщение итогов экспериментальных исследований физических свойств горных пород, выполненных в широком петрографическом и фациальном разнообразии и большом диапазоне масштабов, физических характеристик и термодинамических условий, возникло учение о геофизической среде — активной диссипативной системе [Николаев, 2002; Садовский, 2004; Гуфельд, 2007; Геншафт, 2009]. Стало очевидным, что геосреда существует и эволюционирует в пространстве и во времени на много порядков больше, чем при любых экспериментальных исследованиях. Установлена изменчивость ее параметров на различных пространственных масштабах. Установлены разнообразные законы подобия, выполняющиеся в широком диапазоне масштабов.

К ним, в частности, относятся закон Гутенберга—Рихтера о скейлинговой зависимости частоты повторяемости от энергетического класса землетрясения и закон Кнопова—Когана для распределения интервалов времени между сейсмическими событиями. Фрактальные свойства присущи сейсмоакустоэлектромагнитной эмиссии в периоды между ними [Зосимов, Лямшев, 1995; Фридман и др., 2010].

Получила известность концепция самоорганизации статистических систем в критическом состоянии [Bak, Tang, 1989], а в качестве ее обобщения — модель самоподобной сейсмогенерирующей структуры земной коры, основанная на идее согласования скейлингов (масштабной инвариантности) трех мультифрактальных полей — разломного, сейсмического и сейсмоэнергетичекого [Стаховский, 2007]. Стала очевидной безосновательность попыток противопоставлять или разграничивать сейсмическую, сейсмоакустическую и электромагнитную составляющие излучения. Более рельефно обозначились подходы к анализу спонтанных электромагнитных сигналов литосферного происхождения и механизмов их генерации и распространения [Гульельми, 2007; Богданов и др., 2009б,в; Шуман, 2010а]. Такие понятия, как устойчивость, область притяжения, бифуркации (недетерминированность поведения после прохождения критической точки), странный аттрактор (математический образ хаотических колебаний) и другие, прочно вошли в обиход направления исследований, связанных с изучением различных аспектов геодинамики. Несмотря на интенсивное развитие теории динамических систем (и диссипативных, и консервативных), наличие достаточно мощного теоретического аппарата, адекватное описание геодинамических процессов, генерации и распространения эмиссий все еще является весьма непростой многоаспектной, трудноразрешимой проблемой. К сожалению, большинство понятий из этих областей сильно формализованы, их физический смысл зачастую теряется за фасадом абстрактных рассуждений, терминов и теорем. Тем не менее основная задача нелинейно-динамического подхода к изучению геосреды, по-видимому, состоит в разработке на основе эксперимен-

тальных наблюдений адекватных динамических образов ключевых явлений и процессов, происходящих в геосистеме, и построении на их основе базовых моделей и исследование динамики этих моделей. Разумеется, наличие только временных рядов наблюдений вместо уравнений, описывающих систему и их полного решения, сильно ограничивает информацию об изучаемой системе. И здесь, чтобы продвинуться дальше, очевидно, следует рассмотреть несколько трудных вопросов.

Во-первых, что можно определить по результатам измерений (временным рядам наблюдений). Во-вторых, рассмотреть некоторые вопросы теории самоорганизации таких систем, взаимоотношение самоорганизации и информации, а также приложение элементов этой теории к реальной геосреде, являющейся, как известно, хорошим примером открытой нелинейной диссипативной системы с множеством самоорганизующихся структур (взаимодействующих отдельностей по терминологии М. А. Садовского). В-третьих, это — рассмотрение некоторых аспектов информационного поведения сложных физических систем, возможностей управления распределенными системами, применение фрактальных моделей. Заметим, что именно аппарат современной теории нелинейного управления даже в его ослабленном упрощенном варианте применительно к геосреде использовался весьма слабо.

Цель данной работы — заимствуя результаты и методы сравнительно новой и быстро развивающейся области, сформировавшейся на стыке физики и теории управления [Кадомцев, 1994; Фрадков, 2005; Лоскутов, 2010], привлечь внимание геофизиков к этому кругу проблем, сформулировать некоторые общие положения теории и, по возможности, проиллюстрировать их на некоторых прикладных частных примерах. Сложность и проблемность поставленной задачи очевидна, однако и нет никаких причин, почему бы не попытаться реализовать ее.

Геосреда как открытая диссипативная система. Как уже упоминалось, для Земли можно установить пространственно-временную иерархичность состава, структуры и процессов [Садовский, 2004; Геншафт, 2009]. При этом приходится рас-

сматривать процессы в дискретной (блочной) среде и считать среду многофазной, т. е. учитывать ее твердую, жидкую и газовые компоненты.

Геосреда (литосфера) энергетически насыщена, т. е. находится в неравновесном состоянии. Она непрерывно подвергается действию разномасштабных внешних и внутренних сил. Обычно под внешними силами (полями) подразумевается эволюция приливных деформаций в системе Земля—Луна—Солнце, а под внутренними — широкий спектр физико-химических процессов в системе ядро—мантия—литосфера. Ее неоднородность, блочное строение, насыщенность флюидом, действие приливных деформаций, эндогенная активность Земли отражаются в непрерывном изменении геофизических и гидрогеохимических полей на разных масштабных уровнях.

Согласно работе [Гуфельд, 2007], в качестве основного переменного фактора, определяющего текущую нестабильность среды вблизи состояния, близкого к критическому, может служить восходящий поток легких газов (водород, гелий и др.), а изменчивость ее параметров, которая может быть весьма быстрой, является результатом его непрерывного взаимодействия с твердой фазой литосферы. При этом И. Л. Гуфельд рассматривает три основных процесса, обуславливающих неустойчивость литосферы при прохождении через нее легких газов: формирование пористости с высоким внутренним давлением газов, междуузельная диффузия, фазовые переходы по высокотемпературному типу в присутствии гелия. Далее, как известно, Земля — открытая система. Открытые системы могут обмениваться с окружающей средой энергией, веществом и информацией [Климентович, 1999]. В них возможно спонтанное возникновение различных структур — диссипативных по терминологии И. Пригожина.

Выделяют три класса диссипативных структур: временные, пространственные и пространственно-временные (автоволны) [Климентович, 1999]. Сложность макроскопических открытых систем дает широкие возможности для проявления различных кооперативных явлений — коллективных взаимодействий в

образовании диссипативных структур, формирующихся в результате неравновесных фазовых переходов и формирующих процессы самоорганизации.

Образование самоподобных иерархических структур в геосреде, постоянно подпитываемой энергией земных недр, способствует ее эффективной и быстрой диссипации [Садовский, 2004]. Существенно, что эволюция нелинейных систем может осуществляться разными путями. На смену однозначности приходит множество путей развития, многообразие поведения ее объектов. Причем эти нелинейности могут быть очень большими [Руденко, 2006].

Очевидно, в рамках таких представлений природная среда, стремящаяся к самоорганизации, нуждается в новых моделях описания и анализа, которые бы позволили анализировать диссипацию поступающей в нее энергии из низов литосферы, релаксацию локальных напряжений, стационарные режимы деформирования, вопросы генерации и распространения сейсмических и акустоэлектромагнитных возмущений. С этой точки зрения существующие на сегодняшний день модельные физические эксперименты и математические модели процессов в геосреде все еще далеки от реальности, демонстрируя ограниченность возможностей их описания. Тем не менее идеи о самоорганизации и образовании диссипативных структур оказались продуктивными и важными с точки зрения геофизических приложений [Садовский, 2004; Геншафт, 2009; Николаев, 2002]. В частности, такие системы способны формировать различные (в том числе хаотические) пространственно-временные структуры активности. Эти структуры представляют собой импульсы и фронты возбуждений, неустойчивость которых приводит к установлению в системе самоподдерживающихся колебаний с определенной пространственной конфигурацией. При этом каждый из элементов генерирует последовательность импульсов возбуждения с разными интервалом следования [Безручко и др., 2008].

Сейсмичность, сейсмоакустическая и электромагнитная эмиссии. Как свидетельствует эксперимент, литосфера генери-

рует сейсмические колебания в чрезвычайно широком диапазоне частот — от сотен герц до 10^{-4} Гц. При этом относительно низкочастотные возмущения являются собственными колебаниями Земли и их спектр насчитывает несколько тысяч собственных частот. На эти колебания накладываются сейсмические шумы разной природы (эндогенного и экзогенного происхождения) также в широком спектре частот — от долей герца до килогерц [Геншафт, 2009]. Литосфера является также электродинамически активной средой, способной генерировать электромагнитные возмущения в диапазоне частот от 10^{-4} до 10^{6} Гц [Гохберг и др., 1985; Сурков, 2000; Гульельми, 2007].

Очевидно, непрерывное шумовое сейсмоакустическое и электромагнитное излучения, регистрируемые в геосреде в столь обширном диапазоне частот, свидетельствуют об исключительно высокой энергонасыщенности литосферы.

В последнее время стала доминировать точка зрения, что многие важные геолого-геофизические явления, в том числе генерация и механизмы распространения сейсмоакустического и электромагнитного шумов, связаны с быстрыми процессами изменения физических параметров геосреды [Гуфельд, 2007]. При этом и сейсмичность, и акустоэлектромагнитная эмиссия являются проявлением метастабильного состояния геосреды и обладают высокой чувствительностью к внешним воздействиям, причем отклик сейсмичности и сейсмоакустоэлектромагнитной эмиссии на эти воздействия отражает фундаментальные свойства структуры геодинамических процессов [Николаев, 2002; Садовский, 2004].

Многие вопросы этого круга детально рассмотрены в недавних публикациях [Шуман, 2007, 2010а; Богданов и др., 2009б,в; Цифра, Шуман, 2010,]. По этой причине в данном изложении остановимся лишь на некоторых ключевых аспектах проблемы, акцентируя внимание на общности подходов, следующих из «аксиоматической» теории активных (возбудимых) сред [Васильев и др., 1979] и возможности применения фрактальных моделей [Зосимов, Лямшев, 1995].

Как известно, формулировке «базовых моделей» и обсуждению на их основе физических процессов, происходящих в активных распределенных системах, в настоящее время уделяется значительное внимание [Давыдов и др., 1991]. Установлено, что в распределенных системах могут рождаться, распространяться и преобразовываться сложные и разнообразные волновые процессы. Общепринятой математической моделью описания подобных активных (возбудимых) сред, демонстрирующих большое разнообразие типов динамического поведения и самоорганизации, являются параболические уравнения или их системы типа «реакция—диффузия», имеющие в общем случае пространственно-локализованные, неподвижные и сложнодвижущиеся решения [Давыдов и др., 1991; Цифра, Шуман, 2010]. По аналогии с автоколебательными, кинематические системы, в которых возможно возникновение волн или структур отмеченного типа, называют автоволновыми. Перечень типов автоволновых процессов, известных к настоящему времени, довольно обширен. Это распространяющиеся возмущения в виде бегущего импульса, стоячие волны, синхронные автоколебания во всем пространстве, диссипативные структуры [Васильев и др., 1979]. Одним из наиболее изученных автоволновых процессов является стационарный бегущий импульс.

Отметим существенную разницу между упомянутым бегущим импульсом и нелинейными волнами — солитонами (уединенными волнами). Как известно, уединенная волна (солитон) формируется благодаря взаимному уравновешиванию действия нелинейности и дисперсии. В случае бегущего импульса также существует баланс, но уже между запасенной в системе энергией и диссипацией в ней. Далее солитон при столкновении с себе подобным образованием асимптотически сохраняет свою форму, в то время как два бегущих импульса при столкновении уничтожают друг друга.

Важный результат, вытекающий из асимптотической теории процессов подобного типа, может быть сформирован так: если имеется область пространства (в геосреде это отдельный блок или их система), собственная частота колебаний которой

выше, чем в окружающей среде, то из нее будут распространяться бегущие волны. При наличии же нескольких источников такого рода среда синхронизируется самым высокочастотным из них. Иначе говоря, общее свойство функционирования источников автогенерации волн в активной среде — повышение частоты колебаний во всем пространстве по сравнению с частотой синфазного режима. На этой основе предложен простой способ определения возможности существования автономных источников волн: в среде следует возбудить локальное в пространстве и времени возмущение и проследить за изменением частоты колебаний в некоторой доступной для измерений точке среды.

Следовательно, в неоднородных распределенных системах источником распространяющихся волн могут быть области, в которых собственные частоты колебаний выше, чем в окружающем пространстве (среде). При этом колебательная неустойчивость приводит к формированию стоячих волн.

Обратимся теперь к другому важному аспекту генерации и распространения возмущений в активных средах — волновым процессам во фрактальных структурах [Зосимов, Лямшев, 1995]. Напомним, что фрактал представляет собой множество точек в метрическом пространстве, для которого невозможно определить какую-либо из традиционных мер с целой размерностью — длину, площадь или объем.

Как известно, фрактальные формы присущи огромному числу процессов и структур. Их рассмотрение возможно в двух аспектах. Первый связан с распространением волн, когда фрактал — среда распространения. Второй — с излучением и рассеиванием волн фрактальными структурами, когда волны распространяются в среде с погруженными в нее фрактальными неоднородностями. В однородных средах фрактальные свойства волновых полей появляются обычно вследствие нелинейных взаимодействий волн. В статических волновых задачах фрактальность может быть обусловлена диффузионными процессами.

Принципиальная сторона проблемы — в необычной зависимости интенсивности излучения фрактальной структуры от

расстояния. Далее, фрактальная структура регистрируемого сигнала дает основание искать механизм его генерации в качестве некоторого критического неравновесного процесса. В частности, предполагается, что источником сейсмоакустической эмиссии могут являться фронты переупаковки горных пород, возникающие под действием напряжений в геосреде. При этом критическое состояние на фронте возникает при наличии внешних энергетических воздействий на среду, обуславливающих возникновение фронта деформаций и связанного с ним фронта градиентной скалярной перколяции [Мухамедов, 1992]. Область, вносящую наибольший вклад в акустическое излучение, называют фронтом критичности.

В рассматриваемой модели на участке фронта переупаковки, где концентрация напряжений является критической, образуются кластеры разных размеров. В итоге частицы среды на фронте флуктуируют в результате присоединения или отсоединения кластеров, что и является источником сейсмоакустической эмиссии. Кроме того, изменение структуры напряженно-деформированного состояния приводит к формированию и распространению ассоциируемого с ним фронта волны (автоволны) комплексной диэлектрической проницаемости, связанной с образованием, раскрытием и закрытием трещин, изменением структуры порового пространства, перераспределением в нем флюида, изменением порового давления в порах и трещинах, режима релаксационных процессов и условий разделения зарядов и нарушение токовых систем и, как следствие, изменением электропроводности и диэлектрической проницаемости среды в окрестности фронта распространения. В итоге «волна» комплексной диэлектрической проницаемости или, точнее, с учетом неоднородности и трехмерного характера структуры, «волна» тензора комплексной диэлектрической проницаемости (которая может быть как бегущей, так и стоячей) как бы рассеивается на неподвижных или движущихся зарядах, сгустках зарядов или диполей, присутствующих в среде, порождая электромагнитное (переходное, согласно [Гинзбург, Цытович, 1984]), а, в принципе, и другое излучение. При этом, если энер-

гия физических полей не превышает некоторый критический уровень, возникает генерация связанных акустоэлектромагнитных возбуждений в диапазоне кГц—Гц, наблюдаемых экспериментально [Дмитриевский, Володин, 2006].

Очевидно, имеет смысл различать две компоненты излучения с различными свойствами — излучаемое (бегущее, распространяющееся) поле, которое может существовать без источника, породившего его, и связанное (ближнее квазистационарное), связанное с ним (источником) [Болотовский, Серов, 2009]. В частности, характерный масштаб распространяющихся волн составляет порядка длины волны, в то время как у ближнего квазистационарного поля этот масштаб может быть порядка расстояния от источника до точки регистрации.

Можно предположить, что процессы механоэлектромагнитных преобразований реализуются преимущественно вдоль границ блоков и ослабленных зон, где происходит наиболее активная циркуляция флюидной фазы. Однако число излучателей электромагнитной эмиссии и их мозаичное распределение, вообще говоря, не будет в точности совпадать с мозаикой распределения напряжений в геосреде, а будет определяться как механическими свойствами горных пород, так и коэффициентами (эффективностью) механоэлектромагнитных преобразований. В то же время необходимо учитывать, что, ограничиваясь регистрацией только потока импульсов, не удается идентифицировать вид высокочастотного сигнала, что не позволяет исследовать его частотный спектр и локализацию самого источника (области) излучения.

Заметим, что традиционно сейсмологов интересовали в первую очередь значимые сейсмические события, в то время как сейсмический (да и электромагнитный) шум рассматривался преимущественно в качестве помехи. Ситуация изменилась в последние годы: микросейсмическому и электромагнитному шуму придается самостоятельное значение, рассматривая его в качестве важного источника информации о свойствах геосреды, ее структурных особенностях, условиях деформирования и энергообмена [Спивак, Кишкина, 2003; Садовский, 2004; Гуль-

ельми, 2007; Богданов и др., 2009б,в; Шуман, 2010а]. И хотя энергетический вклад микроколебаний в общую сейсмичность Земли небольшой, а подавляющая часть энергии геоэлектромагнитного поля сосредоточена в главном магнитном поле земного ядра, научная и практическая значимость исследований микросейсмического шума и спонтанного электромагнитного излучения литосферного происхождения несомненна, позволяя по-новому подойти к диагностике локальных участков земной коры.

Открытые системы, энтропия и информация. Остановимся на некоторых понятиях, определениях и вопросах, включая и дискуссионные, касающихся теории самоорганизации физических систем. За некоторыми исключениями [Садовский, 2004; Геншафт, 2009], они не находили широкого признания, поскольку имеющиеся теоретические разработки и построенные примеры носили (и носят) весьма абстрактный характер и было неясно, имеют ли данные конструкции какое-либо отношение к геофизической реальности. Однако ситуация в последние годы существенно изменилась. Возникла нелинейная геофизика — новая область наук о Земле, тесно связанная с нелинейной динамикой (геодинамикой) [Николаев, 2002, Геншафт, 2009]. В частности, геосреда может служить хорошим примером открытых неравновесных систем с множеством самоорганизующихся структур.

Физическая система называется открытой, если она может обмениваться с окружающей средой энергией и энтропией, переносимыми веществом и/или радиацией [Ишаков, 1997]. При этом, если для описания близких к равновесию систем достаточно ограничиться рассмотрением баланса массы, импульса и энергии, то при описании открытых систем определяющую роль играет баланс энтропии.

Энтропия — это в известном смысле мера упорядоченности (или неупорядоченности) динамической системы. Первоначально она была введена в термодинамике как функция состояния, изменение которой определяет количество переданного системе тепла:

$$dQ = Tds\ .$$

Это равенство выражает второй закон термодинамики для обратимых процессов. При обратимом адиабатическом процессе энтропия неизменна. В настоящее время при описании свойства упорядоченности системы известен ряд характеристик, для которых используется термин «энтропия» [Лоскутов, 2010]. Остановимся на некоторых из них.

Энтропия — логарифм фазового объема системы [Мартынов, 1996].

Если есть поток тепла, это означает рождение энтропии [Кадомцев, 1994].

Пусть некоторая открытая система получает извне некоторую упорядоченную энергию с мощностью P. Если температура этой системы равна T, а поступающая энергия имеет энтропию, которую можно охарактеризовать эффективной температурой $T_{эфф}$, то поток негэнтропии (энтропии с обратным знаком) S_i равен

$$-S_i = P\left(T_{эфф}^{-1} - T^{-1}\right). \quad (1)$$

Очевидно, это не та энтропия H, рассматриваемая в теории информации для систем, которые могут находиться в состоянии x_i с вероятностью P_i, и вычисляется по формуле Шеннона:

$$H = -\sum_i P_i \log P_i , \quad (2)$$

либо метрическая энтропия Колмогорова—Синая, которая служит мерой экспоненциального разбегания или сближения траекторий динамической системы [Лоскутов, 2010]. Примечательно, что приток негэнтропии к системе служит мерой всех происходящих в системе физико-химических процессов [Изаков, 1997].

Таким образом, корректное определение и расчет энтропии сложной физической системы связаны с известными затруднениями, даже если известна математическая модель процесса (строгий расчет известен лишь для идеального газа). Тем не менее даже при отсутствии адекватной математической модели на основании известной теоремы Такенса—Паккарда в принципе

можно оценить эту характеристику, так сказать, эмпирически — по одной достаточно длинной реализации какой-либо из координат фазового пространства (или самого процесса) и в условиях отсутствия информации о системе уравнений, т. е. непосредственно по экспериментальным данным [Садовский, 2004].

Другой подход связан с понятием функции Ляпунова (функции состояния системы, убывающей вдоль ее траекторий), являющейся абстрактным аналогом таких физических характеристик, как энергия и энтропия [Фрадков, 2005].

Далее, следуя работе [Изаков, 1997], подытожим свойства энтропии, важные с точки зрения приложений.

Это единственная функция состояния, которая различается в необратимых и обратимых процессах, в первых она растет, а во вторых — не меняется.

Энтропия является мерой неупорядоченности макросистем; ее уменьшение может служить мерой упорядочения, а увеличение — мерой разупорядочения системы.

К сожалению, и такая довольно расплывчатая трактовка роли энтропии не является общепринятой. В частности, на том основании, что такая энтропия в открытых системах не сохраняется, она теряет свое приоритетное положение по сравнению, например, с энергией [Мартынов, 1996]. По мнению Г. А. Мартынова, возрастание энтропии можно рассматривать лишь как признак необратимости протекающих в системе процессов, и далеко не единственный. При этом представление о самоорганизации как образовании структур или как о процессе перехода от менее упорядоченного к более упорядоченному состоянию становится недостаточным. Более фундаментальным здесь является понятие нормы хаотичности [Климонтович, 1999], которая может быть определена по эмпирическим данным.

Далее коснемся вопроса о связи между негэнтропией и количеством информации, актуального с точки зрения приложений. Как известно, К. Шенноном дано два определения информации. Первое из них фактически совпадает с определением энтропии (2). Однако такое определение информации не явля-

ется достаточным при исследовании открытых систем [Климонтович, 1999]. Другое, более адекватное для открытых систем определение, также предложенное К. Шенноном: информация определяется разностью безусловной и условной энтропий и связана тем самым с изменением степени неопределенности о состоянии системы.

Специфике определения понятия информации открытых систем посвящена обзорная работа [Климонтович, 1999]. Отмечается, что с целью более корректного определения информации открытых систем необходима трансформация общей формулы Шеннона для выявления зависимости информации от управляющих параметров, от значений которых сильно зависит поведение системы. Однако в дальнейшем для определенности будем считать, что приток негэнтропии к физической системе равносилен притоку информации [Ишаков, 1997].

Заметим, что рассмотрение открытой системы как управляемой не только притоком энергии, но и информацией, помогает пониманию того, как в процессе самоорганизации развиваются сложные иерархические системы и как она может лучше приспосабливаться к меняющимся условиям окружающей среды.

Диссипативные системы. Как известно, в любой реальной физической системе, в частности геосреде, всегда идут необратимые диссипативные процессы — диффузия, теплопроводность, химические реакции, фазовые переходы, в которых растет энтропия. Макроскопические открытые системы обычно состоят из многих элементов или объектов, принимаемых за элементы структуры. Эти элементы могут быть как микроскопическими, так и макроскопическими. Существенно, что при образовании различного рода структур диссипация играет конструктивную роль. Отметим некоторые общие условия, которые ведут к образованию диссипативных структур [Климонтович, ???]:

1. Они могут образоваться только в открытых системах. Только в них возможен приток энергии, компенсирующий потери за счет диссипации.

2. Диссипативные структуры возникают в макроскопических системах, состоящих из большого числа элементов.

3. Диссипативные структуры возникают лишь в системах, описываемых нелинейными уравнениями для макроскопических функций.

Сложность открытых систем представляет широкие возможности для существования в них коллективных явлений. Они демонстрируют большое разнообразие типов динамического поведения и самоорганизации. Диссипативные системы обладают особенностью сильных изменений под действием слабых внешних воздействий.

Как известно, эволюция нелинейных систем может осуществляться разными путями. На смену однозначности приходит множественность путей развития, многообразие поведения ее объектов, а ограниченная точность в описании системы имеет принципиальное значение. При этом понимание самоорганизации как перехода от хаотического к более упорядоченному состоянию является основой теории образования диссипативных структур. Сам же хаос определяют как некоторый случайный процесс, который наблюдается в динамических системах, не подверженных влиянию шумов или случайных сил [Лоскутов, 2010]. По этой причине теория хаоса рассматривается как часть теории динамических систем.

Как известно, при изучении поведения сложных динамических систем обычный подход, заключающийся в аналитическом вычислении индивидуальных траекторий дифференциальных уравнений, не работает. По этой причине основной задачей теории является исследование устойчивости, изучение роли инвариантных многообразий, анализ геометрической структуры траекторий, поиск инвариантных мер и т. п. [Лоскутов, 2010]. Для диссипативных систем характерны такие инвариантные множества, как устойчивые и неустойчивые стационарные точки и предельные циклы, многомерные притягивающие торы и др. Если диссипативная система имеет много степеней свободы, то у нее может быть много зон притяжения в фазовом пространстве (пространстве состояний). При подпитке энергией извне диссипативная система может испытывать устойчивые колебания (устойчивый цикл в фазовом пространстве), а может

перейти в режим сложного стохастического движения (странного аттрактора).

Странный аттрактор — это некоторое «…сложно устроенное множество в фазовом пространстве, к которому притягиваются почти все траектории из некоторой окрестности этого множества, а на самом множестве движение имеет экспоненциально неустойчивый характер» [Лоскутов, 2010, с. 1307]. Основное свойство систем с диссипацией — сжатие фазового пространства (объема): с течением времени первоначальный объем, занимаемый облаком точек, уменьшается. Фазовое пространство у открытых систем такого типа упрощенно можно представить себе разделенным на области притяжения к различным аттракторам. Как уже отмечалось, для диссипативных динамических систем характерны хаотические явления. В их возникновении важную роль играют предельные циклы — замкнутые фазовые траектории, отвечающие периодическому поведению.

В литературе имеется несколько определений понятия хаотичности. Наиболее распространенное опирается на свойство экспоненциально сильной чувствительности системы к заданию начальных условий или к внешним воздействиям. Другое определение хаотичности динамической системы, помимо чувствительной зависимости от начальных условий, включает и требование сложности (отсутствие рекуррентности) траектории [Лоскутов, 2010, с. 1309].

Заметим также, что в настоящее время понятие «странный аттрактор» приобрело собирательный смысл. Слово «странный» подчеркивает два свойства аттрактора. Во-первых, необычность его геометрической структуры, которая не может быть представлена в виде геометрических элементов целой размерности. Его размерность является дробной (фрактальной). Во-вторых, странный аттрактор — это притягивающая область для траекторий из некоторой окрестной области.

Используя это понятие, хотят подчеркнуть хаотичность системы. Однако понятие «странный» аттрактор оказывается не всегда оправданным: существуют аттракторы, имеющие фрактальную структуру, но при этом система с таким аттрактором

не обладает хаотическим поведением [Лоскутов, 2010, с. 1317]. Но если структура аттрактора хаотической системы неизвестна, как это обычно и бывает на практике, то правильнее называть такие аттракторы хаотическими, акцентируя внимание на сложном поведении траекторий. Но, как уже отмечалось, динамика хаотических систем не является полностью случайной.

Парадоксальность и сложность ситуации очевидна: описание динамики хаотических систем — все еще нерешенная задача. Однако существует возможность постановки ослабленной цели, иного подхода к этой проблеме, при котором изучаются только типичные свойства динамических систем. В этом случае основополагающим понятием при изучении хаотических систем оказывается понятие грубости. В частности, исходя из геометрических предпосылок и без привлечения модельных уравнений, описывающих реальный процесс, были построены «грубые хаотические аттракторы». Примечательно, что с физической точки зрения важны именно грубые (существенные) свойства изучаемой системы, которые сохраняются при малых возмущениях и, следовательно, являются наблюдаемыми [Лоскутов, 2010]. С практической точки зрения возможным является то, что в сложных системах со многими аттракторами может развиваться процесс самоорганизации как в геометрическом пространстве, так и в пространстве других фазовых переменных: при выведении системы из заданного аттрактора (например, с помощью внешнего воздействия) она будет эволюционировать к другому аттрактору, зона притяжения которого включает точку начального состояния системы.

Таким образом, основные задачи нелинейно-динамического подхода к изучению геосистем (в частности, геосреды) заключаются в выработке на основе экспериментальных наблюдений адекватных динамических образов ключевых явлений, происходящих в них, построении на их основе базовых моделей и исследовании динамики этих моделей. Существенно, что, несмотря на трудности, далеко не полный набор которых приведен выше, этот подход уже находит свое применение и продол-

жает эффективно развиваться при решении ряда прикладных задач геофизики.

О реконструкции и идентификации динамических систем. Несмотря на интенсивное развитие теории динамических систем, наблюдаемое в настоящее время, адекватное описание хаотических процессов в диссипативных системах все еще представляет собой весьма сложную, если вообще разрешимую проблему [Лоскутов, 2010]. В геофизике исследуемая система — геосреда — как открытая (с притоком энергии извне) нелинейная диссипативная система, в известной степени может считаться своего рода «черным ящиком». Математически описать протекающие в ней процессы весьма проблематично или практически невозможно, поскольку вывести какие-либо уравнения, исходя из «первых принципов», как говорят физики, удается лишь в исключительных случаях. Задача состоит в том, чтобы, сделав минимум предположений о ее свойствах внутри «черного ящика», попытаться получить максимум сведений о происходящих в ней процессах.

Как известно, стандартный подход к изучению сложных систем такого рода, по существу экспериментальный, основан на анализе регистрируемых приборами сигналов — сейсмоакустических, электромагнитных и др. В геофизике — это прежде всего запись колебаний земной коры или электромагнитных сигналов в широком диапазоне частот в одном или разнесенных пунктах наблюдения. В физике также сигналы обычно называются наблюдаемыми, а метод исследования — реконструкцией динамической системы. В геофизике вместо термина «наблюдаемая» обычно используется понятие «временной ряд». Ясно, что наличие лишь временных рядов некоторой длины в одной или нескольких точках регистрации вместо соответствующих уравнений, описывающих систему, и их полных решений существенно ограничивает объем полученной информации о динамической системе и налагает большие ограничения на возможности ее реконструкции.

Разнообразие специфических ситуаций, наличие шумов различной природы и нестационарность предопределили появ-

ление семейства подходов к изучению временных рядов наблюдений. Эти подходы развивались в рамках математической статистики и спектрального анализа, теории информации, нелинейной динамики и др. [Безруко и др., 2008]. Среди них в первую очередь можно назвать расчет взаимных корреляционных функций когерентности, анализ следования событий во временных рядах, выявление скрытых периодичностей, оценки распределения ближайших соседей в пространстве состояний и т. д. При этом задача идентификации предполагает изучение вопроса о том, каковы параметры системы, породившей данный временной ряд (или ряды) — корреляционная размерность, показатели Ляпунова, степени упорядоченности и др. Существенно, что размеренность аттрактора, энтропию анализируемой динамической системы, некоторые другие инвариантные характеристики в ряде случаев все же оказывается возможным определить по указанным измеряемым величинам [Лоскутов, 2010, с. 1325].

Принципиальное значение, как уже упоминалось, имеет теорема Такенса, в соответствии с которой упомянутые характеристики системы могут быть оценены «эмпирической» даже в случае одной достаточно длинной реализации какой-либо из координат фазового пространства или самого процесса без какой-либо информации об уравнениях, описывающих систему [Лоскутов, 2010, с. 1324—1325].

Одна из старейших задач анализа временных рядов — задача прогноза, содержание которой состоит в предсказании значений измеряемых характеристик объекта на некоторый отрезок времени вперед. К настоящему времени в рамках нелинейной динамики предложен ряд практических методик решения этой задачи. Это сингулярный спектральный анализ локальной аппроксимации и их сочетание [Лоскутов, 2010].

Возможно, для применения методики локальной аппроксимации не требуется задания априорной информации о «черном ящике» — системе, породившей временной ряд.

Методика, основанная на сочетании сингулярного спектрального анализа и локальной аппроксимации, оказалась эф-

фективной при исследовании зачумленных рядов с ограниченной средой.

Одним из перспективных направлений исследований является анализ фрактальных и мультифрактальных свойств временных рядов [Любушин, 2007].

Об управлении распределенными диссипативными системами. В последние годы наблюдается заметный рост числа публикаций, посвященных проблеме управления в физических системах или, в более широком плане, применения кибернетических методов в физике. В соответствии с современной точкой зрения кибернетика понимается как теория управления в широком смысле, к кибернетическим методам относят не только методы управления, но и методы оценивания переменных и параметров систем, методы фильтрации, распознавания образов и др. [Кадомцев, 1994; Фрадков, 2005]. Однако, по мнению А. Л. Фрадкова, задачи управления в физических системах, собственно говоря, существенно отличаются от традиционных задач автоматического управления. Задачи управления в физических системах становятся особенно проблемными при рассмотрении открытых неравновесных диссипативных систем, в частности геосреды, для которых характерны условия для возникновения и развития явлений самоорганизации как в пространственно-временной области, так и в пространстве других фазовых переменных.

Трудности управления такими системами, с одной стороны, объясняются прежде всего сложностью исследуемых систем и многофакторностью действия физических полей различной природы на физически неоднородные и химически активные среды, а с другой — усугубляются практической сложностью или невозможностью локального контроля и влияния. Тем не менее многие исследователи продолжают искать пути реализации этой идеи, в частности решения задачи управления сейсмическим процессом [Национальный…, 2007; Гуфельд, 2007; Шуман, 2011а].

Заметим, что некоторые авторы считают управление в физических системах как принудительное, энергозатратное воз-

действие. При этом скепсис в отношении возможности управления мощными и крупномасштабными процессами посредством слабых сигналов основывается на предположении о том, что энергия управляющего сигнала должна быть сопоставима с энергией объекта воздействия. Ситуация в этой области исследования, согласно работе [Фрадков, 2005], стала достаточно быстро изменяться после выхода в свет статьи «Управление хаосом» [Ott et al., 1990], в которой был сделан вывод о том, что даже малое управление в виде обратной связи, приложенное к нелинейной хаотически колеблющейся системе, может существенно изменить ее динамику и свойства.

У открытых систем с диссипацией, как уже отмечалось, фазовое пространство упрощенно может быть представлено разделенным на области притяжения к различным аттракторам, и для перевода системы с одного аттрактора на другой ее необходимо перебросить из одной области притяжения на другую [Кадомцев, 1994]. Разумеется, для этого требуется затратить определенное количество энергии, где возможно существует некоторое ее минимальное значение, ниже которого такой перевод окажется невозможным. Здесь определяющее значение приобретает наличие информации о структуре фазового портрета системы. Далее, если система неустойчива (а это обычно наблюдается на практике), ее траектории в фазовом пространстве быстро разбегаются и поэтому очень важное значение здесь приобретают начальные данные: чтобы траектория реального движения системы была близка к выбранной, т. е. чтобы она попала в некоторую заданную область фазового пространства, начальные данные должны быть достаточно точными. Сама же информация о фазовом портрете системы может быть получена путем прослеживания за траекториями. Именно так и функционируют системы управления: они следят за реальной траекторией и малыми сигналами корректируют ее, переводя на необходимую [Кадомцев, 1994].

Очевидно, переброс системы из одной области притяжения в другую с минимальными энергетическими затратами можно реализовать в точках бифуркации, где для выбора иной траек-

тории развития достаточно немного изменить начальные данные (т. е. использовать для этой цели слабый сигнал). Разумеется, здесь важна не только информация о структуре фазового пространства системы, но и ее содержание, т. е. указание, в какой конкретно аттрактор система переводится (или какая траектория предпочтительна).

Говорят об управляемости системы, если при вариации входного параметра в области допустимых (реализуемых практически) значений область изменения выходного параметра (характеристика поведения) охватывает значения, отвечающие желаемым режимам функционирования системы [Фрадков, 1994]. Следовательно, только слабое, имманентное текущему состоянию системы внешнее воздействие, реализующее иной выбор ее развития в точке ветвления, можно с полным правом назвать управлением или регуляцией.

Диссипация затрудняет управление энергией системы. В этом контексте представляют практический интерес оценки преобразования энергии систем при заданных уровнях управления и диссипации. В этом случае для изучения изменения характеристик системы в результате управления вводят количественную меру пределов этого изменения, которое может зависеть от выбора входа и выхода системы и допустимой (или возможной) величины управляющего воздействия [Фрадков, 2005]. Такая характеристика получила название «индекса возбудимости» системы, причем он может быть измерен экспериментально аналогично обычной частотной характеристике линейной системы: при измерении индекса возбудимости изменяется амплитуда (мощность) входного сигнала, а сам сигнал задается в виде обратной связи.

Ясно, что в этом случае мы воспользовались ослабленной, упрощенной постановкой задачи управления, более естественной с точки зрения геосистем: найти управляющую функцию с минимальной нормой, обеспечивающую перевод системы из одного аттрактора (аттрактора разрушения) в любую точку притяжения другого аттрактора.

Очевидно, главная проблема при реализации попытки управления в геосреде — это трудности, связанные с изменением ее характеристик и состояния, а также осуществлением управляющего воздействия на относительно коротких промежутках времени. По существу, здесь мы встречаемся и имеем дело с наиболее ярким, характерным и сложным случаем «черного ящика», при котором информация о структуре системы, ее фазовом портрете минимальна, сложна для получения или фактически отсутствует. В таком случае вполне правомерен следующий вопрос: имеются ли возможности управления или воздействия на сейсмичность в геосреде хотя бы на некотором локальном участке или области, если к ней (геосреде) подходить как к чисто релаксационной системе, ограничиваясь малыми сигналами?

На первый взгляд при низком пороге контролируемого воздействия на геосистему кажется целесообразным воспользоваться резонансным режимом возбуждения колебаний в системе, при котором происходит наиболее эффективная передача энергии от возбуждающей (управляющей) системы к возбуждаемой. Однако, вообще говоря, в чисто релаксационной системе (геосреде) собственных частот нет и, как следствие, невозможен резонанс в классическом его понимании: в нелинейной системе частота колебаний зависит от амплитуды.

Очевидно, в этом случае можно попытаться продвинутся дальше, если воспользоваться явлением, представляемым традиционно как «стохастический резонанс» [Климонтович, 1999; Анищенко, 1999]. Как известно, эффект стохастического резонанса определяет группу явлений, при которых отклик нелинейной системы на слабый внешний сигнал заметно усиливается с ростом интенсивности шума в системе. Установлено, что наличие источников шума в нелинейных динамических системах может индуцировать новые режимы их функционирования, которые не могут быть реализованы в отсутствие шума, т. е. шум может выступать в роли конструктивного фактора, вызывающего рост степени порядка в системе.

Таким образом, идея может состоять в том, чтобы воздействовать на среду, комбинируя (согласовывая) контролируемое и естественно-шумовые воздействия [Шуман, 2010а]. Во всяком случае, имеются все основания предполагать, что это обстоятельство может пролить свет на существующую неопределенность в результатах экспериментальных попыток воздействия на сейсмический процесс [Гуфельд, 2007; Шуман, 2011а]. Ясно также, что классические принципы управления физическими системами с учетом данного обстоятельства нуждаются в коррекции. Это заставляет также придавать больший вес и значение организации, проведению и результатам мониторинга за геофизическими процессами, углубленной обработке получаемой информации с целью оптимального управления геосредой.

О пороге регуляции. Коснемся далее двух частных вопросов. Первый из них относится к возможности дистанционного управления деформационными процессами в массиве горных пород, а второй — к управлению сейсмическим процессом.

Как уже отмечалось, неравновесные диссипативные системы обладают особенностью сильных изменений под действием слабых воздействий. Их характерная особенность — неустойчивость и пороговый характер самоорганизации. Только слабое, имманентное данному состоянию меняющейся системы внешнее воздействие, способствующее протеканию целевого процесса или выбору целевого направления в точке ветвления, можно назвать управлением или, точнее, регуляцией. Иначе говоря, энергетика эффективного управления несоизмеримо мала по сравнению с энергетикой управляемого процесса.

Как известно, среди процессов, протекающих в геосреде, особая роль принадлежит сейсмичности, акустической и сейсмической эмиссии [Николаев, 2002; Садовский, 2004]. И сейсмичность, и сейсмоакустическая эмиссия отражают метастабильное состояние вещества земных недр и обладают высокой чувствительностью к внешним воздействиям. Показано существование верхних амплитудных порогов фоновой регуляции, отличающей ее от грубого нарушения хода естественной самоорганизации в системе. В частности, продемонстрирована воз-

можность осуществления макроперемещений по границам (контактам) структурных блоков при относительно слабых вибрационных возмущениях на блочную среду [Гуфельд, 2007; Национальный …, 2007]. Исследована механика инициирования межблоковых подвижек динамическими импульсами. При этом относительное движение блоков наблюдалось на временном интервале, многократно превышающем действие инициирующего колебания. Как оказалось, порогом эффективного воздействия на блочную среду, очевидно, являются колебания с амплитудой, превышающей уровень микросейсмического фона в соответствующем диапазоне частот [Национальный …, 2007].

Большое значение здесь имеет характеристика, определяющая степень возрастания энергии системы вследствие воздействия, получившая название «индекса возбудимости» [Фрадков, 2005]. Что касается искусственного (контролируемого) воздействия на сейсмичность и очаги возможных сильных землетрясений, вопрос решается сложнее. Как известно, существуют по меньшей мере два класса динамических факторов, контролирующих изменение сейсмичности (потока землетрясений) в пределах крупных тектонических структур [Гарькавый и др., 1994; Фридман и др., 2010]. Во-первых, это глобальный механизм (Т-компонента, от англ. total — глобальный), контролирующий изменение во времени общего числа сильных землетрясений, и, во-вторых, М-компонента (от англ. mirror — зеркальный) для северного и южного полушарий и линейная L-компонента, характеризующаяся долговременным ростом или спадом сейсмической активности. При этом Т-компонента наиболее отчетливо проявляется для самых сильных ($M \geq 5{,}5$) землетрясений, а М-компонента — при рассмотрении всего спектра землетрясений, в котором доминируют слабые события.

Правомерна следующая постановка вопроса: можно ли путем упреждающего воздействия или их последовательности снять хотя бы частично напряжения, накопленные в очаговой зоне и тем самым форшоками уменьшить энергию основного разрушительного толчка? По всей вероятности, ответ должен быть положительным. В частности, экспериментально установ-

лено, что подземные ядерные взрывы на полигонах Невада, Семипалатинск, Новая Земля и Лобнор, проводившиеся в течение 25 лет, способствовали разрядке тектонических напряжений и заметно снизили уровень сейсмичности на всем земном шаре [Национальный…, 2007; Фридман и др., 2010]. При этом наиболее характерные изменения сейсмического режима наблюдались у наиболее сильных землетрясениях с магнитудой $M \geq 8{,}3$: фактически в это время (1966—1988 гг.) землетрясения с указанной магнитудой не наблюдались [Фридман и др., 2010, рис. 16].

Что касается влияния на региональную компоненту сейсмичности, то, во-первых, обнаружено инициирующее воздействие мощных электромагнитных импульсов от МГД-генератора на умеренные и слабые землетрясения с дальнодействием порядка 300 км. Во-вторых, обнаружено также влияние на сейсмичность массовых бомбардировок, имевших место в Югославии, Ираке и Афганистане. Дальнодействие эффекта — около 500 км. [Национальный…, 2007].

Очевидно, подземные ядерные взрывы или массовые бомбардировки территории вряд ли можно отнести к средствам управления уровнем сейсмической активности. Тем не менее они все же дают некоторые представления о пороге регуляции, хотя вопрос об его минимальном уровне остается открытым. Трудности его решения, очевидно, связаны с модуляцией потока землетрясений и сейсмоакустической эмиссии приливными напряжениями, избирательной чувствительностью к инициирующему периодическому воздействию, изменениям скорости вращения Земли и положения ее оси, атмосферного давления и т. д., способствующих разрядке магнитной энергии недр. Однако необходимость и целесообразность комбинированного (согласованного) воздействия на очаг готовящегося землетрясения стало очевидным, может быть переведена в практическую плоскость и дает повод для сдержанного оптимизма. Во всяком случае, понимание реального сейсмотектонического процесса дает основания для постановки таких исследований.

Заключение. Как следует из приведенного обзора, подход, основанный на идеях и принципах нелинейной динамики, по-

лучивший в последние годы значительное развитие, является одним из важных и перспективных направлений исследования геосистем, а динамические модели, построенные на его основе, открывают новые пути и возможности для объяснения, понимания и прогноза механизмов функционирования и развития как отдельных составных элементов геосреды, так и их ансамблей сложной архитектуры.

Разработаны новые подходы к анализу временных геофизических рядов различной природы с позиций теории нелинейных динамических систем. В этой связи возрастают роль и значение мониторинга, ориентированного на выявление общей структурной организации различных физических процессов, происходящих в сейсмоакустоэлектромагнитно-генерирующей среде. Пришло понимание и осознание типичности хаотического поведения нелинейных систем. Доказано, что хаос может рождаться разными путями независимо от природы динамической системы. При этом, исследуя временные ряды наблюдаемых, можно отличить случайное стохастическое поведение систем от детерминированного хаоса [Лоскутов, 2010]. Существенно, что данное направление приобретает все большую популярность в исследовании геосистем. Важнейший результат, полученный здесь, это возможность управления сейсмическим процессом достаточно слабыми сигналами контролируемых или естественных источников, соответствующими тонким механизмам самоорганизации диссипативных геоструктур в геосреде. При этом акценты современной теории, очевидно, смещаются в сторону:

а) выделения и исследования структурно-устойчивых (грубых) систем и явлений;
б) анализа структуры разбиения фазового пространства (пространства состояний) системы (геосреды), его размерности по временным реализациям геофизических полей;
в) исследования эволюции колебательных процессов и выявлении точек бифукаций, определяющих перестройку этих процессов.

Отчетливо видны и трудности применения нелинейно-динамического подхода к изучению геосистем, обусловленные их необычностью и сложностью, отсутствием необходимой информации об их структуре, принципах межсистемных взаимодействий, возможности различного физического содержания процессов на разных уровнях структурной организации.

Очевидно, понимание этих проблем и процессов, а также реализация самого понимания требует времени и усилий.

Электродинамика фрактальных сред, переходное фрактальное рассеяние и электромагнитный шум литосферы

Геофизический журнал,
№ 1, Т. 34, 2012, С. 3—13.

Введение. К настоящему времени стало предельно ясно, что геосреда — очень специфический объект исследований. Как известно, учение о геосреде появилось в результате обобщения многолетних экспериментальных исследований физических свойств горных пород исключительно в широком петрофизическом и фациальном разнообразии масштабов, физических характеристик и термодинамических условий [Николаев, 2002; Садовский, 2004; Гуфельд, 2007; Геншафт, 2009 и др.]. Оказалось, она не может рассматриваться в качестве пассивного континуума — ей присуща внутренняя самоподобная структура, в которой нет места какой-либо области с характерными размерами и границами, как не существует и какого-либо характерного масштаба [Садовский, 2004]. Геосреда непрерывно подвергается воздействию разномасштабных внутренних и внешних сил: на нее постоянно действуют флуктуационные и периодические возмущения, создавая в совокупности некое шумовое поле. Она может находиться в различных метастабильных состояниях с несколькими положениями равновесия.

Очевидно, сходство в структуре и динамических явлениях в ней можно наблюдать на лабораторных образцах горных пород в условиях нестационарных процессов, характерных именно для геосреды [Гуфельд, Матвеева, 2011]. Полагают, что в качестве основного переменного фактора, контролирующего и определяющего текущую неустойчивость литосферы и стимулирующего обмен энергией между отдельными ее элементами, может служить восходящий поток легких газов, а изменчивость ее параметров, которая может быть весьма быстрой, является результатом непрерывного взаимодействия этого потока с твердой фазой литосферы. При этом рассматривают два основных процесса, обуславливающих неустойчивость литосферы при прохождении через нее легких газов (в основном, водорода и гелия): формирование пористости с высоким внутренним давлением газов и накопление легких газов в междоузлиях с последующей их восходящей диффузией [Гуфельд, Матвеева, 2011].

Характерной особенностью геосреды, не моделируемой при нагружениях лабораторных монолитных образцов, являются быстрые и разномасштабные вариации объемно-напряженного состояния, рассматриваемые как реакция геосреды на взаимодействие восходящих потоков легких газов с ее твердой фазой [Гуфельд, 2007]. В итоге можно предположить, что литосфера — открытая и неравновесная система, в которой непрерывно меняются ее параметры. В ней существуют комплексы нелинейных взаимодействий между физическими полями, структурами и подсистемами, происходит трансформация энергии механической в химическую или электромагнитную, термической в механическую и т. д. С этой точки зрения уровень экспериментальных исследований рассматриваемых систем не соответствует и не отвечает уровню понимания протекающих в них процессов.

Как известно [Геншафт, 2009], принципиально важным свойством открытых систем является их иерархичность (фрактальность) и волновая природа. При этом сами процессы формирования геологических сред и систем, содержащих фрак-

тальные структуры, очевидно, носят нелинейный характер. Не будет преувеличением сказать, что если вещество не находится в газообразном или кристаллическом состоянии, то оно имеет в некотором диапазоне масштабов фрактальную структуру [Зосимов, Лямшев, 1995].

Согласно общепринятому определению фракталов, к ним относится множество точек, размерность Хаусдорфа—Безиковича которых не совпадает с их топологической размерностью [Зосимов, Лямшев, 1995]. Однако определение хаусдорфовой размерности, требующее предельного перехода к бесконечно малым объемам, невозможно использовать в физических измерениях. Поэтому содержательное для физики определение фрактала включает свойства самоподобия.

Напомним, что понятие фрактала тесно связано с хаосом в динамических системах, в которых он порождается собственной динамикой нелинейной системы, т. е. ее свойством экспоненциально быстро разводить сколь угодно близкие траектории [Зосимов, Лямшев, 1995]. При этом образ хаоса в фазовом пространстве — странный аттрактор — представляет собой фрактал. В итоге один из наиболее содержательных подходов к фрактальному анализу процессов опирается на предположение о том, что соответствующий процесс порождается динамической системой с хаотическим поведением [Зосимов, Лямшев, 1995]. Важно подчеркнуть: несмотря на то, что каждая отдельная хаотическая траектория (решение уравнений движения системы) чрезвычайно чувствительна к малым возмущениям, странный аттрактор (совокупность всех возможных траекторий) является достаточно устойчивой структурой. В рамках такого подхода, очевидно, пришло время отойти от традиционной гипотезы, которая отводит особую роль гладким непрерывным функциям и целочисленным мерам, и попытаться таким образом повысить результативность сейсмоакустических и электромагнитных зондирующих систем путем привлечения результатов, относящихся к исследованию волновых процессов во фрактальных средах, с одной стороны, и фрактальных структур, присущих волновым полям различной природы, с

другой. Первостепенный интерес здесь представляют, во-первых, проблемы, связанные с распространением волн во фрактальных структурах, когда фрактал — это среда распространения, и, во-вторых, излучение и рассеивание волн фрактальными структурами.

Важно подчеркнуть, что фрактальные системы, как правило, обладают более высокими удельными излучательными параметрами, чем сплошные среды [Смирнов, 1993]. Иначе говоря, образование фрактальных агрегатов в геосреде ведет к резкому увеличению мощности генерируемого в ней сейсмоэлектромагнитного шума. Заметим также, что при излучении волн фрактальными структурами особенности их поведения возникают уже в простейшем случае независимых излучателей с фрактальным расположением в пространстве. Существо дела — в необычной зависимости интенсивности излучения такой фрактальной структуры от разноса [Зосимов, Лямшев, 1995]. Эти результаты, очевидно, открывают новые возможности создания зондирующих систем и показывают перспективы современных теоретических и практических приложений. По сути дела, речь может идти о новом направлении в геофизике, в частности геоэлектрике, идея которого состоит в применении элементов современной теории фракталов, теории детерминированного хаоса, дробной меры и скейлинговых инвариантов.

За последнее десятилетие появились многочисленные публикации, в которых подчеркивается нелинейный и фрактальный характер эволюции Земли и применяются подходы, разработанные в теории динамических систем и теории фракталов [Геншафт, 2009]. Установлены самоподобные (фрактальные) свойства сейсмического процесса и среды, в которой он протекает. К ним, в частности, относятся закон Гутенберга—Рихтера о скейлинговой зависимости частоты повторяемости от энергетического класса землетрясения и закон Кнопова—Когана для распределения интервалов времени между сейсмическими событиями. Тем не менее освоение новой парадигмы даже в сейсмологии идет довольно трудно [Стаховский, 2007; Геншафт, 2009]. В еще большей степени это относится к геоэлектрике:

имеется не так много работ, касающихся особенностей распространения электромагнитных возмущений во фрактальных средах, в частности фрактального подхода к электроразведке гетерогенных сред [Потапов, 2000; Филатов, 2002; Балханов, Башкуев, 2007; Балханов и др., 2009]. По этой причине естественно и актуально сосредоточить внимание на вопросах электродинамики фрактальных сред, в частности распространении электромагнитных волн во фрактальной диэлектрической среде с потерями и переходном фрактальном рассеивании, важных с точки зрения геоэлектрических приложений. Автор надеется, что эти вопросы, помимо их самостоятельного интереса, дадут возможность также лучше понять особенности обычной электродинамики сплошных сред, позволяя взглянуть на нее как бы со стороны.

Вопросы электродинамики фрактальных сред. Как известно, исследование излучения, распространения и рассеяния электромагнитных волн во фрактальных средах привело к появлению нового направления в классической электродинамической теории — фрактальной электродинамики, объединяющей фрактальную геометрию и теорию электромагнетизма [Болотов, 2002; Боголюбов и др., 2009; Тарасов, 2011]. Ее предмет составляет изучение электромагнитных процессов в пространстве, заполненном веществом с фрактальной структурой. К фрактальным структурам, как уже упоминалось, относят фрактальные кластеры, фрактальные поверхности, перколяционные кластеры и другие образования, наблюдаемые в экспериментах [Болотов, 2002]. Без преувеличения можно сказать, что фрактальные формы присущи большому числу процессов и структур. К примеру, фрактальную структуру имеет фронт просачивающейся сквозь случайную пористую среду жидкости, области концентрации напряжений в геосреде и т. д. Трудности электродинамического описания таких сред обусловлены зависимостью их макроскопических электромагнитных параметров (диэлектрической и магнитной проницаемостей, проводимости) от рассматриваемого объема и делает невозможным применение

стандартной модели сплошной среды, в которой они определяются однозначно для физически бесконечно малых объемов.

Электродинамика фрактальных сред также оперирует физическими величинами, усредненными, однако, по «физически бесконечно малым» фрактальным элементам объема. В итоге ключевым элементом здесь является процедура усреднения, построение которой оказывается возможным с использованием фрактальных и мультифрактальных мер [Болотов, 2002; Боголюбов и др., 2009]. Существует несколько направлений в развитии математического аппарата электродинамики фрактальных сред. При этом все они основаны на фрактальных (канторовых) мерах. В частности, вводят в рассмотрение дробное интегродифференцирование или используют аппарат обобщенных функций, построение которых опирается на структуру множества Кантора [Болотов, 2002; Боголюбов и др., 2009]. Фундаментальным результатом здесь является тот факт, что эволюция фрактальных систем описывается интегродифференциальными уравнениями нецелого порядка [Нигматуллин, 1992]. Как известно, дробное интегродифференциальное исчисление позволяет учесть эффекты пространственной и временной нелокальности в качестве единого математического формализма. Заметим, однако, что обычно используемое в электродинамике предположение о принадлежности функций диэлектрической проницаемости $\varepsilon(r)$, магнитной проницаемости $\mu(r)$ и проводимости $\sigma(r)$ к классу Липшица—Гельдера не позволяет непосредственно в уравнениях Максвелла заменить обычные производные на дробные производные Римана—Лиувилля [Нигматуллин, 1992; Боголюбов и др., 2009; Потапов, 2009].

Кратко остановимся на одном из первых способов введения дробного интегродифференцирования в уравнения электродинамики материальных сред [Боголюбов и др., 2009; Потапов, 2009]. Здесь получена система уравнений Максвелла в дробных производных:

$$\mathrm{rot}\mathbf{E} = -\frac{1}{\tau}\partial_{0t}^{\alpha} B \,,$$

$$\mathrm{rot}\mathbf{H} = j + \frac{1}{\tau}\partial_{0t}^{\alpha} D\,,$$

$$\mathrm{div}\mathbf{B} = 0\,,\ \mathrm{div}\mathbf{D} = \rho\,, \qquad (1)$$

где τ — некоторое характерное время процесса, $\partial_{0t}^{\alpha} y(t)$ — регуляризованная дробная производная (оператор Капуто):

$$\partial_{0t}^{\alpha} y(t) = \mathrm{sign}^n(t-s) D_{st}^{\alpha-n} \frac{d^n y(t)}{dt^n}\,,$$

$n-1 < \alpha \le n$, $n = N$, $D_{st}^{\alpha} y(t)$ — оператор дробного интегродифференцирования Римана—Лиувилля порядка $\alpha \in R$ с началом в точке s:

$$D_{st}^{\alpha} y(t) = \begin{cases} \dfrac{\mathrm{sign}(t-s)}{\Gamma(-\alpha)} \displaystyle\int_s^t \frac{y(t')dt'}{|t-t'|^{\alpha+1}},\ \alpha < 0, \\ y(t),\ \alpha = 0,\ \alpha = 0, \\ \mathrm{sign}^n(t-s) \dfrac{d^n}{dt^n} D_{st}^{\alpha-n}(t), \end{cases}$$

$n-1<\alpha\le n$, $n \in N$, $\Gamma(x)$ — гамма-функция Эйлера, t — безразмерное (отнесенное к τ) время.

Вводя вектор-потенциал $\mathbf{A}$ и скалярный потенциал φ

$$\mathbf{B} = \mathrm{rot}\mathbf{A}\,,\ \mathbf{E} = -\frac{1}{\tau}\partial_{0t}^{\alpha} A - \nabla\varphi$$

и используя калибровку

$$\mathrm{div}\mathbf{A} + \frac{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}{\tau}\partial_{0t}^{\alpha}\varphi = 0\,,$$

стандартным путем приходим к следующим уравнениям для потенциалов $\mathbf{A}$ и φ [Потапов, 2009]:

$$\Delta\mathbf{A} - \frac{\varepsilon\mu}{(c\tau)^2}\partial_{0t}^{2\alpha} A = -\mu\mu_0\mathbf{j}\,,$$

$$\Delta\varphi - \frac{\varepsilon\mu}{(c\tau)^2}\partial_{0t}^{2\alpha}\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon\varepsilon_0}\,, \qquad (2)$$

где $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ — скорость света в вакууме. Эти уравнения, получившие название диффузионно-волновых, представляют собой уравнения с изменяющимся типом. При α=1 они принадлежат к гиперболическому типу, при α=1/2 — к параболическому. При этом феноменологический параметр α учитывает влияние фрактальных свойств движения зарядов в среде на создаваемое электромагнитное поле.

Как известно, перемена типа дифференциального уравнения принципиально меняет свойства его решений. Одно из наиболее существенных отличий связано с различным характером распространения локальных возмущений. В частности, уравнения гиперболического типа, в отличие от параболического, допускают разрывные (фронтальные) решения. Далее, с уменьшением α происходит затухание электромагнитных волн, причем при α < 1/2 затухание имеет степенную асимптотику, свойственную для фрактальных сред [Боголюбов и др., 2009; Потапов, 2009]. Таким образом, электромагнитное поле в этом случае обладает особенностями, не имеющими аналогов в обычной электродинамике сплошных сред: существование дробно-степенных асимптотик (дробно-степенных хвостов у решений уравнений этого типа) [Нигматуллин, 1992; Тарасов, 2009]. Соответственно, электромагнитные поля во фрактальных средах в общем случае демонстрируют дробно-степенную релаксацию. Коснемся теперь смысла полей, входящих в уравнение Максвелла. Как известно, большинство авторов исходят из постулата Розенфельда, в соответствии с которым определение полей **E** или **B** однозначно следует из выражения для силы Лоренца:

$$\mathbf{F} = e\mathbf{E} + e\left[\mathbf{v} \times \mathbf{B}\right].$$

Безусловно, это верно для вакуума, но не применимо в случае конденсированных сред [Виноградов, 2002]. При движении в среде частица поляризует среду и теряет энергию, что приводит к дополнительной силе, которая, в свою очередь, зависит от вида материальных уравнений. Последние же зависят от определения полей. В итоге определение полей **E** и **B** посредством

силы Лоренца возможно только после определения полей [Виноградов, 2002].

По мнению А. П. Виноградова, возможен другой, более последовательный путь определения полей, связанный с определением граничных условий, справедливость которых может быть установлена экспериментально или с помощью микроскопической теории, описывающей структуру приповерхностного переходного слоя — метод полости. Поле внутри полости равно **E**(**H**), если полость вытянута вдоль силовых линий поля. Если же полость сплюснута, поле равно **D**(**B**). Последнее обстоятельство — следствие максвелловских граничных условий. Следовательно, если предположить справедливость максвелловских граничных условий, то имеем метод измерения полей.

Метод полости для определения макроскопических полей непротиворечив, причем задание граничных условий является необходимым и достаточным условием решения этой проблемы [Виноградов, 2002].

Заметим далее, что материальные уравнения обычно вводятся как соотношения, дополняющие уравнение Максвелла до замкнутой системы уравнений. Их физический смысл состоит в том, что они описывают реакцию среды на внешнее электромагнитное воздействие. При этом последовательное определение диэлектрической и магнитной проницаемостей подразумевает однозначное разбиение индуцированного тока в среде на части, одна из которых ответственна за электрическую поляризацию, а другая — за намагничение. Однако в среде, как правило, присутствуют флуктуации материальных свойств различных масштабов. В итоге ток в данной точке среды может давать вклад в электрическую поляризацию на одном масштабе усреднения и в намагничивание на другом [Виноградов, 2002]. В этом смысле вопрос о многообразии материальных уравнений остается в известной степени открытым для сред с фрактальной структурой. К тому же, как правило, не известны сколь-нибудь продвинутые статистические характеристики фрактальных структур [Зосимов, Лямшев, 1995], хотя для реальных сред самоподобие и следует понимать в статистическом смысле. Само-

подобие и свободная масштабируемость фрактальных структур означает, что для них, вообще говоря, отсутствуют какие-либо внутренние характерные масштабы. Однако в реальных фрактальных средах, как правило, имеется некоторый максимальный масштаб, ограничивающий область фрактального поведения.

В рассматриваемом контексте обратим внимание еще на одно важное обстоятельство. В ряде работ утверждается, что ключевым параметром для описания взаимодействия излучения и вещества является показатель преломления. Как известно, в случае поглощающей, но не магнитной среды роль показателя преломления играет величина

$$\sqrt{\tilde{\varepsilon}} = n + i\gamma ,$$

где $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon - i\sigma / \omega$ — комплексная диэлектрическая проницаемость. Однако для широкого спектра сред понятие «показатель преломления» вообще не имеет к ним непосредственного отношения. Взаимодействие излучения и вещества, вообще говоря, задается, как известно, параметрами материальных уравнений, т. е. проницаемостями, тогда как показатель преломления описывает изменение фазы волны весьма частного вида поля — плоской монохроматической бегущей электромагнитной волны. Но в неоднородной среде нет бегущих волн — волны являются стоячими [Раутиан, 2008]. В лучшем случае здесь можно говорить о его локальном значении в какой-то определенной точке среды или о некоем его эффективном значении в рамках какой-то аналогии с континуальной средой.

Остановимся далее на двух характерных примерах применения аппарата фрактальной электродинамики к решению задач, актуальных с точки зрения геоэлектрических приложений. Первый из них касается распространения электромагнитных возмущений в диэлектрической среде с потерями [Тарасов, 2009], а второй — переходного фрактального рассеивания (излучения), сопутствующего переходным фрактальным процессам в геосреде [Болотов, 1998, 2002]. Эти примеры, очевидно, имеют и методический интерес: активное применение дробных

интегралов и производных сдерживается отсутствием у них прозрачной физической интерпретации. Их четкая физическая трактовка несомненно способствовала бы расширению их геоэлектрических приложений.

О распространении электромагнитных волн во фрактальной диэлектрической среде с потерями. Простой пример, который может дать новый взгляд на электромагнитные процессы, относится к динамике электромагнитного поля в диэлектрической среде с потерями, восприимчивость χ которой в широком диапазоне частот удовлетворяет дробно-степенной зависимости. В литературе неоднократно обращалось внимание на сложную природу коэффициента пропорциональности в простом линейном уравнении:

$$\mathbf{P}(\mathbf{r}) = \varepsilon_0 \chi_e \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \varepsilon_0 (\chi_r - 1)\mathbf{E}(\mathbf{r}), \qquad (3)$$

где $\mathbf{P}(\mathbf{r})$ — плотность поляризации, $\chi_e(\omega) = \chi_e'(\omega) - i\chi_e''(\omega)$ — диэлектрическая восприимчивость, $\varepsilon_r = \varepsilon_r' - i\varepsilon_r''$ — относительная диэлектрическая проницаемость, ε_r=8,854·10^{-12} Ф/м — диэлектрическая постоянная [Ландау, Лившиц, 1959; Кинг, Смит, 1984 и др.].

Как свидетельствует эксперимент, для большинства материальных сред диэлектрическая восприимчивость в широкой частотной области соответствует скорее дробно-степенному закону, называемому универсальным ответом, а не классическому дебаевскому поведению, редко наблюдаемому экспериментально [Тарасов, 2009]. В частности, эта закономерность установлена для биполярных сред вне области частот максимальных потерь и в средах, поляризация которых является результатом перемещений ионных или электронных носителей зарядов. В итоге для широкого класса сред можно записать [Тарасов, 2009]

$$\chi_e(\omega) = \chi'(\omega) - i\chi''(\omega),$$

$$\chi'(\omega) \approx \omega^{n-1},\ \chi''(\omega) \approx \omega^{n-1} \text{ для } \omega >> \omega_p,$$

$$\chi'(0) - \chi'(\omega) \approx \omega^m,\ \chi''(\omega) \approx \omega^m \text{ для } \omega << \omega_p, \qquad (4)$$

где ω_p — частота максимальных потерь, $\chi'(0)$ — статическая поляризация, $0<n$, $m<1$.

Следовательно, для низкочастотной области спектра $\omega<<\omega_p$ дробно-степенная зависимость χ_e может быть записана в виде [Тарасов, 2009]

$$\tilde{\chi}_e(\omega) = \tilde{\chi}(0) - \chi_\beta (i\omega)^\beta, \quad 0<\beta<1 \tag{5}$$

с некоторыми положительными константами $\tilde{\chi}(0)$, $\tilde{\chi}(\omega)$, $\beta=m$.

Теперь, следуя работе [Тарасов, 2009], для плотности поляризации $\mathrm{P}(\mathbf{r}, t)$ приходим к соотношению

$$\mathbf{P}(\mathbf{r},t) = \varepsilon_0 \chi(0)\mathbf{E}(\mathbf{r},t) - \varepsilon_0 \chi_\beta \left(D_t^\beta \mathbf{E}\right)(\mathbf{r},t), \quad 0<\beta<1, \tag{6}$$

где D_t^β — преобразование Фурье дробной производной Лиувилля:

$$D_t^\beta f(t) = \frac{1}{\Gamma(k-\beta)} \frac{\partial k}{\partial t^k} \int_{-\infty}^{t} \frac{f(t')dt'}{(t-t')^{\beta-k+1}}, \; k-1<\beta<k.$$

Далее, используя классические уравнения Максвелла:

$$\operatorname{rot}\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = -\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r},t)}{\partial t},$$

$$\operatorname{rot}\mathbf{B}(\mathbf{r},t) = \mu_0 \left[\mathbf{I}(\mathbf{r},t) + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r},t)}{\partial t}\right],$$

$$\operatorname{div}\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = \varepsilon_0^{-1}\rho(\mathbf{r},t),$$

$$\operatorname{div}\mathbf{B}(\mathbf{r},t) = 0, \tag{7}$$

где среда немагнитная, $\mathbf{I}(\mathbf{r},t) = \mathbf{j}(\mathbf{r},t) + \frac{\partial \mathbf{P}(\mathbf{r},t)}{\partial t}$, стандартным путем приходим к следующему уравнению для электрического поля $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ и индукции в среде $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$:

$$\varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{r},t)}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{P}(\mathbf{r},t)}{\partial t^2} + \frac{1}{\mu} \times$$

$$\times \left(\operatorname{grad}\operatorname{div}\mathbf{E}(\mathbf{r},t) - \nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r},t) + \frac{\partial \mathbf{j}(\mathbf{r},t)}{\partial t^2}\right) = 0,$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{B}(\mathbf{r},t)}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon\mu_0}\nabla^2 \mathbf{B}(\mathbf{r},t) + \frac{1}{\varepsilon_0}\frac{\partial}{\partial t}\mathrm{rot}\,\mathbf{P}(\mathbf{r},t) + \frac{1}{\varepsilon_0}\mathrm{rot}\,\mathbf{j}(\mathbf{r},t). \qquad (8)$$

Принимая во внимание, что в области низких частот ($\omega << \omega_p$) $\mathbf{P}(\mathbf{r}, t)$ и $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ связаны соотношением (6), можно записать [Тарасов, 2009]

$$\frac{1}{V_\beta^2}\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \frac{a_\beta}{V_\beta^2}\left(D^{2+\beta}\mathbf{E}\right) + \left(\mathrm{grad}\,\mathrm{div}\mathbf{E} - \nabla^2\mathbf{E}\right) = -\mu\frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t}, \quad 0<\beta<1,$$

$$\frac{1}{V_\beta^2}\frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} - \frac{a_\beta}{V_\beta^2}\left({}_0D_t^{2+\beta}\mathbf{B}\right) - \nabla^2\mathbf{B} = -\mu_0\mathrm{rot}\mathbf{j}, \quad 0<\beta<1, \qquad (9)$$

где

$$V_\beta^2 = \frac{1}{\varepsilon_0\mu_0\left[1+\chi(0)\right]}, \; a_\beta = \frac{\chi_\beta}{1+\chi(0)},$$

$D_t^{2+\beta}$ — дробная производная Римана—Лиувилля на полуоси $[0, \infty)$.

Заметим, что параметр $\beta = m$ определяется показателем m, фигурирующим в уравнениях (4), и подлежит экспериментальному определению.

Полученные таким образом уравнения (9) относятся к классу дробных дифференциальных уравнений. Важное свойство процесса, описываемого уравнением такого типа, — его дробно-степенное затухание, обусловленное существованием дробно-степенных «хвостов» у их решений [Нигматуллин, 1992; Тарасов, 2009].

Другой важный аспект проблемы — уравнения (9) предсказывают скорость распространения электромагнитного процесса, отличающуюся от предельной скорости распространения сигналов $V_0 = \sqrt{1/\varepsilon_0\mu_0}$. Как известно, для сред с дисперсией становится необходимым введение понятий фазовой и групповой скорости распространения сигнала, скорости распространения энергии и фронта импульса [Гинзбург, 1967; Вайнштейн,1976; Шуман, 2000].

Электромагнитное излучение литосферы, сопровождающее переходные фрактальные процессы. Как уже отмеча-

лось [Шуман, 2010а,в], неравновесность, нелинейность, неустойчивость реальной структуры геосреды — основные предпосылки или исходные принципы, на которых строится теория спонтанной электромагнитной эмиссии литосферного происхождения. При этом восходящие потоки легких газов (водород, гелий и др.) могут выступать в качестве основного фактора, контролирующего текущую неустойчивость литосферы и стимулирующего обмен энергией между отдельными элементами или подсистемами геосреды. Эти представления положены И. Л. Гуфельдом в основу физико-химической модели сейсмичности (концепция динамической неустойчивой среды [Гуфельд, 2007]). На энергетических потоках в таких системах возможно возникновение статических, пульсирующих или бегущих областей концентрации флюида, которые получили название автоволн, подчеркивая таким образом тот факт, что их характеристики (форма, скорость распространения и др.) определяются в основном параметрами геосреды.

Изменение структуры напряженно-деформированного состояния и механических свойств (в частности, проницаемости) разломных зон в результате деформаций, вызванных блоковыми движениями, в свою очередь определяют вариации флюидодинамического режима, тепловых и эманационных потоков из недр, режима релаксационных процессов, условия разделения электрических зарядов и нарушения токовых систем [Спивак и др., 2009]. Очевидно, электродинамика такой самоподобной самоорганизующейся структуры оказывается тесно связанной с ее механикой, флюидодинамикой и термодинамикой. В частности, с фронтом концентрации флюида может быть связано формирование и распространение фронта волны (автоволны) комплексной диэлектрической проницаемости или, точнее, волны тензора комплексной диэлектрической проницаемости с учетом неоднородностей и трехмерного характера структуры за счет образования, раскрытия и закрытия трещин, изменения структуры порового пространства, перераспределения в нем флюидной компо-

ненты, изменения порового давления и, как следствие, изменения электропроводности и диэлектрической проницаемости среды.

Как известно, если в течение некоторого промежутка времени система электрических зарядов испытывает перестройку (параметры системы изменяются), то в течение этой перестройки система неизбежно излучает электромагнитные волны [Болотов, 1998].

В частности, волны комплексной диэлектрической проницаемости, рассеивающиеся на отдельных зарядах, сгустках зарядов, электрических диполей и других рассеивателях, содержащихся в среде (или появляющихся в ней в процессе ее деформирования), порождают электромагнитные, а в принципе и другие типы волн [Гинзбург, Цытович, 1984]. Важно, что изменение параметров геосреды могут быть очень быстрыми. Энергия дегазации может быстро перемещаться вдоль шовных зон и глубинных разломов, быстро концентрироваться и высвобождаться со скоростью взрывной или даже детонирующей волны (взрывной распад гелия и водорода при сбросе давления в зоне разлома [Гуфельд, 2007; Вол, Пилат, 2006]).

В геофизических приложениях концепция рассеивания и излучения волн фрактальными структурами в процессах перестройки структуры пород впервые получила распространение в сейсмологии. В частности, одна из моделей касается вопроса генерации сейсмоакустической эмиссии, источниками которой являются фронты переупаковки пород, которые могут описываться моделью перколяции в градиенте концентрации флюида [Гийон и др., 1991; Мухамедов, 1992; Зосимов, Лямшев, 1995]. При этом критическое состояние на фронте возникает самопроизвольно при внешних энергетических воздействиях на среду, обуславливающих возникновение фронта деформаций. Согласно работе [Мухамедов, 1992], модель фронта градиентной перколяции позволяет дать физическую интерпретацию наблюдаемых параметров высокочастотного сейсмоакустического шума как неравновесного самоорганизованного критического процесса.

Что касается электродинамической стороны вопроса, то эффект переходного рассеяния хорошо изучен при изменении диэлектрической проницаемости во времени по периодическому закону. Его исследованию посвящена обширная литература [Гинзбург, Цытович, 1984]. В большинстве опубликованных работ этого цикла обычно изучается частотный спектр и угловое распределение переходного излучения. Показано, что оно сосредоточено в некотором «конусе», зависящем от угла излучения между волновым вектором **k** и скоростью **v** заряда. При этом **v** — скорость, с которой движется фронт волны диэлектрической проницаемости [Гинзбург, Цытович, 1984]. Геоэлектрический аспект проблемы изложен в работах [Шуман, Богданов, 2008; Шуман, 2010а,в,г].

В рассматриваемом аспекте большой интерес вызывает переходное фрактальное рассеяние, связанное с фрактальностью электродинамических структур [Болотов, 1998; 2002]. В работе [Болотов, 2002] вместо обычного анализируемого изменения диэлектрической проницаемости ε по гармоническому закону

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 \cos\left(\mathbf{k}_0\mathbf{r} - \omega_0 t\right) \tag{10}$$

рассмотрена задача переходного рассеивания всплеска диэлектрической проницаемости $\varepsilon(\mathbf{r}, t)$ вида

$$\varepsilon\left(\mathbf{r}, t\right) = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 \gamma_\xi \left(\mathbf{k}_0\mathbf{r} - \omega_0 t\right) \tag{11}$$

на покоящемся заряде. Здесь ε_0 — невозмущенная диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится заряд; ε_1 — изменение ε, обусловленное прохождением волнового фронта; $\mathbf{k}_0$ и ω_0 — частота и волновой вектор расходящейся от заряда электромагнитной волны; γ_ξ — функция диссипативного всплеска, основная особенность которой — связь ее фурье-представления с множеством Кантора. Функция Кантора — это ограниченная (сверху и снизу) монотонная неубывающая функция, постоянная на удаленных из отрезка $[0, 1]$ интервалах и меняющаяся скачком в точках канторова дисконтинуума («чертова лестница») [Болотов, 1998, 2002].

Такой достаточно сложный вид диэлектрической проницаемости может формироваться, например, ударными волнами в рассматриваемой среде (фронтами переупаковки пород), распространяющимся фронтом концентрации флюидной фазы и др.

Очевидно, физическая картина может быть представлена следующим образом. Внедрение флюида порождает растущий перколяционный кластер, расширение которого происходит нерегулярно, скачками. В результате продвижения фронта внедрения в пористой среде (эволюции перколяции внедрения) и возникают сейсмоакустический и электромагнитный «шумы».

Если рассеянные волны для конкретности считать поперечными (по отношению к вектору **k**), то их поле, в отличие от классического решения для всплеска (10) [Гинзбург, Цытович, 1984], содержит в качестве множителя не δ-функцию $\delta(\omega-\mathbf{kv})$, а обобщенную функцию Кантора $\Delta_\xi\left(\frac{\omega}{\omega_0}+\frac{1}{2}\right)$, которую можно выразить через обратное преобразование Фурье [Болотов, 2002]:

$$F^{-1}\left[e^{ik/2}\gamma_\xi(k)\right]=2\pi\Delta_\xi\,.$$

Это указывает на то, что излучение происходит в некотором достаточно широком диапазоне частот, определяемых обобщенной функцией Кантора.

Таким образом, диссипативный всплеск диэлектрической проницаемости вида (11) при рассеянии на покоящемся заряде формирует широкодиапазонный фрактальный спектр электромагнитного излучения, частоты которого сосредоточены в точках множества Кантора [Болотов, 2002]. Сама же структура спектра колебаний определяется масштабами, ограничивающими диапазон проявления фрактальных свойств среды и значением спектральной размерности. Заметим, однако, что распространяющийся фрактальный фронт всплеска диэлектрической проницаемости является недифференцируемым и, вообще говоря, не имеет нормали. По этой причине становятся пробле-

матичными или исключаются вообще такие привычные понятия, как «лучевая траектория» или «лучевая оптика». Тем не менее переходное фрактальное рассеяние, являющееся, бесспорно, одним из источников широкополосного электромагнитного излучения, регистрируемого в геофизическом эксперименте, может быть использовано для диагностики хаотической динамики геосреды, решения других актуальных задач геологии и геофизики. Очевидна также общность и взаимосвязь процессов генерации и распространения сейсмоакустического и электромагнитного шумов литосферного происхождения, который возникает в результате продвижения в геосреде фронта внедрения глубинного флюида, представляющего собой сложную открытую энергетически концентрированную систему, постоянно меняющую свои состав и свойства.

Имеются ли прямые экспериментальные свидетельства в пользу обоснования предложенной И. Л. Гуфельдом концепции динамически неустойчивой геосреды? Ответ должен быть положительным, хотя, разумеется, в проблемах планетарной дегазации Земли следует учитывать ряд существенных обстоятельств, отличающих поведение горных пород в естественном залегании от лабораторных экспериментов на их образцах [Гуфельд, 2007; Гуфельд, Матвеева, 2011]. В рассматриваемом контексте следует упомянуть также результаты исследований по генерации акустической эмиссии при разрушении насыщенного водородом металлического образца, выполненные Gannelli G., Cantelli R., Corsero A. (Phys. Rev. Lett. 70. 3923, 1993) и приведенные в обзоре [Зосимов, Лямшев, 1995]. Насыщение образца водородом осуществлялось при высокой температуре, а его разрушение (образование микротрещин) происходило в результате охлаждения. Установлено распределение амплитуд импульсов акустической эмиссии вида $N=A^{-0,9}$, причем такая зависимость выполнялась на интервале амплитуд более чем в два порядка.

Заключение. В настоящее время явно ощущается недостаточность традиционных геоэлектрических моделей, касающихся геосреды, хотя, очевидно, сама по себе теория электромаг-

нитных процессов в ней и ее электродинамического описания богата глубокими результатами и развитым теоретическим аппаратом. В частности, стало очевидным, что достаточно полное описание процессов генерации и распространения возмущений, их взаимодействия со средой невозможно согласно формулам, полученным на основе представлений об электромагнитном отклике в пространстве целочисленной меры и гладких функций. Фрактальные модели качественно меняют подходы и методы их анализа. Имеются весомые аргументы в пользу того, что результативность электромагнитных зондирующих систем может быть значительно повышена благодаря учету фрактальности свойств и волновых явлений в геосреде на всех этапах генерации, распространения и рассеивания электромагнитных возмущений в ней. Фрактальные модели среды (и процесса) дают возможность подвести физическую основу под эти подходы. В рассматриваемом контексте актуально построение теории фрактальной электродинамики, предмет которой составляет изучение электромагнитных процессов в средах с фрактальной структурой.

С точки зрения геоэлектрических приложений представляет интерес также теория переходного рассеивания диссипативного всплеска диэлектрической проницаемости на покоящемся заряде, сгустках зарядов или диполей, имеющихся в геосреде. Важное методическое значение имеет то обстоятельство, что электромагнитные поля в диэлектриках и диэлектриках с потерями, восприимчивость которых в широкой частотной области удовлетворяет дробно-степенному закону, описываются дифференциальными уравнениями с производными нецелого порядка по времени. Существенно, что физическая интерпретация дробных интегралов и производных может быть связана с фрактальными свойствами среды. Фракталы заставляют пересмотреть традиционные взгляды на геометрические свойства объектов в геосреде, а динамический хаос вносит существенные изменения в понимание того, как эти объекты могут вести себя во времени. При этом применение фрактальных моделей отнюдь не сводится к перефразировке или переформулирова-

нию известных положений на новый язык, а дает возможность прийти к новым самостоятельным и плодотворным с точки зрения геоэлектрических приложений концепциям и идеям.

Встретившись с новой идеей, вы, скорее всего, поступите правильно, если выскажетесь против нее.

Генри Уивер

Электромагнитная эмиссия литосферы: всегда ли мы адекватно трактуем то, о чем как будто бы знаем?

Геофизический журнал, № 2, Т. 34, 2012, С. 4—19.

Введение. Проблемы неадекватности интерпретационных моделей, вопросы соотношения теории и эксперимента, взаимодействия мифов и реальности — не новость для работ геофизического цикла. Достаточно вспомнить в этой связи в качестве примера идею «сверх разрешения» в теории электромагнитных зондирующих систем [Шуман, 2003; Каменецкий, 1999], ряд моделей и механизмов связей в системе литосфера—атмосфера—ионосфера при сейсмической активности [Липеровский, 2006] или локального описания электромагнитного МТ-отклика, регистрируемого на земной поверхности [Шуман, 2008а, 2010б]. В последние годы их число возросло в связи с изучением электромагнитных сигналов литосферного происхождения в широком диапазоне частот [Богданов и др., 2009; Шуман, 2010а,г].

К сожалению, неадекватность присуща не только частным, но и базовым интерпретационным моделям [Шуман, 2003]. При этом неадекватность интерпретационных моделей может проявляться

как в игнорировании экспериментальных данных, так и в абсолютизации частотных моделей, многие из которых имеют лишь косвенное отношение к действительности, превращению их в некоторые универсальные шаблоны, пригодные на все случаи жизни. Кроме того, обильно представлена эмпирика без должного теоретического обоснования.

Как известно, теоретическое знание — это суть соединения эмпирики с неформальными идеями, базирующимися на обобщенном опыте. И здесь особая роль принадлежит парадоксам — неожиданным суждениям, противоречащим общепринятым представлениям. Наиболее интересные из них — парадоксы типа теория—опыт, для которых характерно противоречие между теоретическими представлениями и экспериментом или интуицией. Хороший пример такого рода — ситуация, возникшая при изучении электромагнитного шума на акваториях, когда трасса распространения излучения литосферного происхождения при его выходе на водную поверхность включает интервал, соответствующий хорошо проводящему слою морской воды. Здесь мы особенно рельефно встречаемся с ситуацией, когда явления, которые по мнению многих исследователей невозможны, обнаруживаются в эксперименте [Ершов, Паламарчук, 2008; Ершов и др., 2010; Паламарчук, Кирейтов, 2010; Шуман и др., 2011].

Представляется уместной в этой связи постановка по крайней мере двух вопросов. Первый — можно ли получить информацию о строении и динамике литосферы под дном моря или океана, регистрируя электромагнитное излучение на поверхности водной среды или даже над ней в атмосфере? И второй — как эти сигналы проявляются на этой границе раздела, и о чем свидетельствует натурный эксперимент? Парадоксально, но в принципиальном плане можно дать положительный ответ на первый из них и предложить механизмы выноса электромагнитной компоненты излучений на поверхность морской среды и в атмосферу при ответе на второй [Ершов и др., 2010; Паламарчук, Кирейтов, 2010; Шуман и др., 2011]. Тем не менее все еще остается ряд трудных вопросов физически геомагнитных флуктуаций, относящихся к механизмам их генерации, «сверх-

дальнего» распространения, глубинной привязки источников генерации, диагностики, требующих своего решения и вызывающих оживленные дискуссии [Богданов и др., 2009; Шуман, 2010а,г]. Разумеется, здесь речь не может идти о спекуляциях, игнорирующих общепринятые физические принципы, в частности электродинамики материальных сред. При этом каждый из исследователей вправе придерживаться той или иной точки зрения, согласуя свои представления с новыми опытными данными.

Заметим также, что исследование электромагнитных флуктуаций литосферного происхождения является важной составной частью фундаментальной и прикладной геофизической науки, поскольку именно флуктуации динамических переменных геосреды определяют большой класс физических явлений, происходящих в ней.

Состояние проблемы. Как свидетельствует эксперимент, наблюдается большое разнообразие электромагнитных возмущений, регистрируемых на земной поверхности в широком диапазоне частот от 10^{-4} до 10^{6} Гц и выше. Одни из них возбуждаются в атмосфере, другие — в магнитосфере и ионосфере в результате взаимодействия солнечного ветра с геомагнитным полем или проникают в магнитосферу Земли из межпланетной среды, третьи генерируются внутриземными источниками [Atmospheric …, 1999; Сурков, 2000; Gershenson, Bambakidis, 2001; Гульельми, 2007]. Регистрируются электромагнитные сигналы индустриального происхождения.

К источникам электромагнитного излучения обычно относят грозовые разряды, предгрозовое излучение, непрерывно-шумовое радиоизлучение грозовых облаков и циклонов. Физическую природу предгрозового и непрерывно-шумового излучения обычно связывают с колебаниями поверхностей заряженных капель воды, их дроблением и коагуляцией. Непрерывно-шумовое излучение грозовых облаков и циклонов наблюдается на частотах от сотен кГц до сотен МГц. Излучают радиоволны и различные светящиеся объекты, возникающие в атмосфере и имеющие пламенное происхождение. Однако наи-

более мощные и постоянно действующие источники электромагнитного излучения сосредоточены в ионосфере и магнитосфере. Они генерируют так называемые геомагнитные пульсации — наиболее регулярные естественные поля в диапазоне периодов от 0,3 до 600 с. Компонента электромагнитного излучения, источники которой находятся в верхнем полупространстве, содержит регулярную суточную и сезонную компоненты, особенности которых находят объяснение в соответствующих циклических изменениях грозовой активности на земном шаре, условиях распространения волн в волноводе земля—ионосфера, ионосферных и магнитосферных процессах.

Экспериментально установлено, что в структуре регистрируемых на дневной поверхности естественных импульсных электромагнитных полей высокую долю составляют также импульсы литосферного происхождения [Гохберг и др., 1979, 1985, 1988; Левшенко, 1995; Atmospheric …, 1999; Сурков, 2000; Богданов и др., 2003; Гульельми, 2007; Шуман, 2007; Шуман, Богданов, 2008, 2010]. Отмечается, что генерация электромагнитного шума в литосфере может происходить как спонтанно, вне прямой связи с проявлением сейсмичности, так и вынужденно, вследствие подвижек горных пород при сейсмическом воздействии [Левшенко, 1995; Сурков, 2000; Гульельми, 2007]. Предложена схема классификации регистрируемых сигналов [Левшенко, 1995]. Отмечается, что при описании теоретических подходов к изучению спонтанных сигналов авторы, как правило, ограничиваются лишь крайне схематичной, качественной стороной вопроса, в то время как «…путь изучения вынужденных сигналов литосферного происхождения в целом ясен» [Левшенко, 1995]. В последнем случае, в зависимости от того, приходят ли электромагнитные возмущения в пункт их регистрации из сейсмического очага, с фронта сейсмической волны или возбуждаются сейсмической волной непосредственно в окрестности точки наблюдения, они подразделяются на три вида, каждый из которых может возбуждаться в результате действия деформационного, индукционного или инерционного механизмов генерации. В свою очередь, механизмы генерации

подразделяются в зависимости от того, какой тип движения земной коры ответственен за генерацию — за счет вектора перемещений элемента земной коры **u**, скорости деформации $\mathbf{v}=\alpha\mathbf{u}/dt$ и ускорения $\mathbf{w}=\alpha\mathbf{v}/dt$.

Предложено общее линейное уравнение генерации, включающее все эти механизмы генерации [Левшенко, 1995; Гульельми, 2007]. Развита методика выделения сигналов литосферного происхождения на фоне интенсивных атмосферно-ионосферно-магнитосферных возмущений, которые в этом случае выступают в роли помех. Она основана на использовании свойств однородности поля источников этого типа по площади, в то время как источники электромагнитных возмущений, расположенные в литосфере, генерируют поля с повышенным поверхностным градиентом. В частности, плоские неоднородные, вертикально поляризованные электромагнитные волны, возбуждаемые молниевыми разрядами, распространяются в сферическом волноводе «земля—ионосфера» с затуханием, не превышающим единиц децибел на тысячу километров. Поверхностный градиент полей геомагнитных пульсаций также не превышает нескольких единиц пикотесла на километр. Однако в том случае, если источник электромагнитного поля находится в земной коре, ситуация существенно иная: для трассы распространения в среде с удельным сопротивлением $\rho \approx 10 \div 10^3$ Ом·м, характерным для условий земной коры, на частотах 10^4—10^6 Гц коэффициент затухания превышает 10^2—10^3 дб/км [Гохберг и др., 1985]. Понятно, что для выхода излучения этого диапазона на дневную поверхность необходимо предположить либо существование полей в среде очень высоких напряженностей, либо наличие полноводных каналов. Напомним в этой связи, что возможность дальнего распространения излучений на расстояния, превосходящие мощность скин-слоя, в принципе может реализоваться в двух случаях. При наличии, во-первых, в среде немонотонной зависимости фазовой скорости волны от поперечных к направлению распространения координат (например, глубины) и, во-вторых, промежуточного «дисперсионного окна», в частотном диапазоне которого

электромагнитные импульсы могут распространяться на значительные расстояния без существенных искажений [Шуман, Причепий, 2004]. Однако отмеченные обстоятельства отражают лишь специфический или, точнее, экзотический аспект проблемы. Поэтому внимание исследователей концентрировалось на рассмотрении ансамбля излучателей, в частности ансамбля раскрывающихся в очаге трещин и реализации своеобразного эффекта «когерентного» усиления создаваемого или суммарного сигналов [Сурков, 2000]. При этом основное внимание традиционно уделялось СНН-диапазону (300 Гц—3 кГц) или еще более низким частотам, скин-глубина на которых в реальных геоэлектрических условиях может превышать десятки километров [Гохберг и др., 1988]. Что касается использования с этой целью радиоизлучения с частотами десятки и сотни кГц и выше, то характерная мощность скин-слоя будет составлять первые сотни метров, и электромагнитные возмущения этого типа из-за сильного поглощения не могут выйти из глубинных очагов на дневную поверхность. В итоге сформировалось представление о том, что регистрируемое на поверхности Земли излучение, скорее всего, соответствует электромагнитным процессам, протекающим, в основном, вблизи этой границы [Гохберг и др., 1988, с. 17]. Однако в приповерхностном слое «…трудно найти достаточное число источников радиоэмиссии и еще труднее связать ее с процессом подготовки землетрясения» [Сурков, 2000, с. 118]. Таким образом, скептицизм большинства исследователей в отношении связи этого излучения с землетрясениями, по мнению В. В. Суркова, достаточно обоснован и было бы преждевременным обсуждать эти явления.

В рассматриваемом контексте обратим внимание на важное обстоятельство: при рассмотрении вопросов распространения возмущений этого типа земная кора принималась в качестве пассивного континуума. Это — пористая влагонасыщенная среда, обладающая магнитной структурой и находящаяся в подмагничивающем поле земного ядра. Именно применительно к такой модели реальной среды А. В. Гульельми и В. Т. Левшеенко было предложено общее уравнение генерации электромагнит-

ных сигналов литосферного происхождения и проанализирована эффективность механизмов генерации [Левшенко, 1995; Гульельми, 2007].

Разумеется, в рамках классической электродинамической теории нет особых причин для сомнений или беспокойства по этому поводу. Использование такой модели вполне допустимо и оправдано, но, как оказалось, далеко не всегда. Как свидетельствует обширный натурный эксперимент, в суммарном излучении присутствует составляющая, обладающая специфическими свойствами и нуждающаяся в более подробном рассмотрении [Богданов и др., 2003; 2008; Шуман, 2007, 2008, 2010в; Старостенко и др., 2009]. В первую очередь это касается электродинамической модели геосреды — активной диссипативной структуры [Шуман, 2010а,г]. Согласно В. Т. Левшенко, теоретические подходы к анализу спонтанных литосферных сигналов этого типа неизвестны и в схеме классификации, предложенной им, обозначены значком «?» [Левшенко, 1995].

Кажется очевидным, что одним из перспективных направлений исследований явлений этого типа является подход, основанный на идеях нелинейной динамики. Концептуальная новизна этого подхода состоит в том, что проблему генерации и распространения электромагнитного шума литосферы предполагается решать в рамках распределенных возбудимых сред (диссипативных структур) с учетом многообразия механоэлектромагнитных преобразований и эмпирических закономерностей, свидетельствующих о связи характеристик излучения со структурой и динамикой геосистем, которые не могут быть поняты и объяснены в рамках классической теории скин-эффекта. Понятно, что в этом случае на передний план выступают неустойчивые системы и возбудимые среды, демонстрирующие большое разнообразие типов поведения и самоорганизации.

Некоторые результаты экспериментальных исследований последних лет. В последние годы с использованием в качестве носителя измерительной аппаратуры наземные, воздушные и водные виды транспорта ООО «Юг-нефтегазгеология» выпол-

нен большой объем точечных, профильных и площадных исследований по регистрации электромагнитного излучения на земной поверхности и над нею, являющихся уникальными как по объему и географии, так и по характеру полученной информации [Богданов и др., 2007, 2009; Старостенко и др., 2009; Коболев, 2011; Шуман и др., 2011]. Регистрация излучения осуществлялась измерительным комплексом «Астрогон», включающим регистратор, приемник GPS и интерфейсный адаптер, обеспечивающим высокую технологичность и автономность проведения измерений. Регистратор измеряет интенсивность импульсного потока, отображающего количество импульсов электромагнитного излучения в единицу времени (обычно 1 с) с амплитудой, превышающей заданный порог (обычно выше 5 мкВ). На основе современной элементной базы и цифровой обработки данных удалось достичь высокой точности (±5 %) и большого динамического диапазона (0,055—15 нТл) измерений параметров геомагнитных флуктуаций в диапазоне частот 1,5—70 кГц (по уровню 3 дБ) [Богданов и др., 2009]. Силами ООО «Юг-нефтегазгеология» с использованием комплекса «Астрогон» и самолета Х-32-912 выполнены измерения распределения интенсивности излучения на региональном профиле МОГТ Лозовая—Шебелинка—Старопокровка длиной 190 км, вдоль линии регионального профиля ГСЗ DOBRE от восточной границы Украины через Донбасс до Азовского моря длиной 360 км в двух направлениях (с северо-востока на юго-запад и обратно) на высотах 300 и 800 м [Старостенко и др., 2009].

Выполнен значительный объем измерений на серии профилей, пересекающих береговую линию Тарханкутского полуострова в субширотном направлении, а также вдоль линии субширотного профиля, пересекающего структуру Субботина на Прикерченском шельфе Черного моря и южном окончании профиля DOBRE [Шуман и др., 2011].

Проведены измерения интенсивности излучения вдоль одного и того же профиля в северо-западной части Черного моря в 2007 и 2010 гг. соответственно с борта НИС «Владимир Паршин» [Богданов и др., 2007] и «Профессор Водяницкий» [Кобе-

лев, 2011]. Отмечается высокое сходство полученных записей. Полученные результаты измерений сопоставлялись с имеющимися сейсмогеологическими разрезами вдоль этих профилей [Старостенко и др., 2009; Шуман и др., 2011].

Эти результаты позволяют сделать следующие выводы:

– в составе регистрируемого суммарного сигнала на земной поверхности, над нею, на уровне моря и над ним значительную долю составляет компонента литосферного происхождения;

– распределение интенсивности излучения вдоль профилей обладает упорядоченной структурой, тесно связанной со строением и динамикой геосреды, при этом пространственные размеры и форма аномалий могут служить основой для восстановления элементов геометрии геологических объектов;

– геологические объекты, с которыми связаны аномалии интенсивности радиоизлучений, регистрируемые на дневной поверхности и над нею, располагаются в том числе и на глубинах, значительно превосходящих мощность скин-слоя в рассматриваемом диапазоне частот;

– и, возможно, главный результат экспериментальных исследований последних лет — это возможность получения информации о структуре геосреды под морским дном.

Заметим, что по крайней мере часть из приведенного перечня выводов подтверждается и экспериментальными данными, полученными другими авторами и в других регионах [Ершов, Новик, 2008; Ершов и др., 2010; Паламарчук, Кирейтов, 2010]. Спутниковые измерения электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,1—20 кГц также указывают на то, что каждый тип структуры литосферы характеризуется особым характером распределения интенсивности излучения [Ларина и др., 2001].

Приведенные аргументы качественно меняют существо дела. Предельно ясно, что мы нуждаемся в качественно новых представлениях и моделях генерации и распространения излучений, которые бы позволили анализировать их пространственно-временную структуру и механизмы выхода на дневную поверхность. В итоге вырисовывается набор интересных во-

просов, решение которых, очевидно, потребует более детального, чем это обычно принималось, понимания свойств геосреды и ее электродинамического описания, расширенных модельных представлений о механизмах и типах механоэлектромагнитных преобразований [Шуман, 2010а,г].

Геосреда и ее теоретические модели. В предыдущем разделе внимание концентрировалось на наиболее существенных результатах экспериментального исследования электромагнитных флуктуаций радиоволнового диапазона, регистрируемых на поверхности Земли, важных с точки зрения понимания проблемы их физических механизмов генерации и распространения. Следующий вопрос — какова роль геосреды и ее строения в этом процессе.

Как известно, геосреда — очень специфический объект исследования [Даниленко, 1992; Старостенко и др., 2001; Садовский, 2004; Дубровский, Сергеев, 2006; Стаховский, 2007; Гуфельд, 2007; Кисин, 2008; Геншафт, 2009 и др.]. Это несплошная, неоднородная, неизотропная структура, разбитая на блоки разной величины. Основная ее особенность — иерархическое распределение по размерам ее элементов (блоков), перемещающихся как единое целое и взаимодействующих в процессе перемещения. Эти перемещения сосредоточены, в основном, вдоль их границ и включают процессы дробления, деформации и пластического течения отдельностей, зацепления механической и физико-химической природы, объемного деформирования и разрушения в пограничных областях блоков.

Неоднородность геосреды, насыщенность флюидами, действие приливных деформаций в системе Земля—Луна—Солнце, эндогенная активность Земли отражаются в непрерывном изменении геофизических, гидрогеохимических и других полей на разных ее масштабных уровнях. При этом в качестве основного переменного фактора, определяющего текущую нестабильность геосреды вблизи состояния, близкого к критическому, очевидно может служить восходящий поток легких газов (водород, гелий), а изменчивость ее параметров, которая может быть быстрой, является результатом его непрерывного взаимо-

действия с твердой фазой литосферы [Гуфельд, 2007; Кисин, 2008]. Существенно, что энергия дегазации может быть эффективно переброшена вдоль шовных зон и глубинных разломов, быстро сконцентрирована и высвобождена со скоростью «взрывной или детонирующей волны» [Вол, Пилат, 2006].

Геосреда является активной средой. Согласно работе [Васильев и др., 1979], характерными признаками активных сред являются:

– наличие распределенного источника энергии или веществ, богатых энергией;

– каждый ее элемент находится в состоянии, далеком от термодинамического равновесия;

– связь между элементарными объемами осуществляется за счет процессов переноса.

Разумеется, при этом приходится рассматривать процессы в дискретной (блочной) среде и учитывать ее твердую, жидкую и газовые компоненты.

Геосреда — хороший пример открытой неравновесной системы с множеством самоорганизующихся структур. При этом под структурой системы (пятном организации, блуждающим по среде) обычно понимают способ организации ее элементов и характер связей между ними. Как известно [Кадомцев, 1994], для самоорганизации необходимо наличие двух элементов — энергии и негэнтропии (энтропии с обратным знаком). В литосфере самым мощным источником как энергии, так и негэнтропии является тепловой поток из земных недр. Он и приводит в действие механизмы самоорганизации в ней.

В любой реальной системе, в том числе геосреде, всегда идут необратимые диссипативные процессы (диффузия, вязкость, теплопроводность, химические реакции, фазовые переходы). Отличительные признаки нелинейных диссипативных систем — волновая (автоволновая) и резонансная природа процессов, большая роль малых возмущений. Такие системы способны формировать различные (в том числе и хаотические) пространственно-временные структуры активности, представляющие собой импульсы и фронты возбуждения, неустойчи-

вость которых приводит к установлению в системе самоподдерживающихся колебаний с определенной пространственной конфигурацией [Васильев и др., 1979]. При этом каждый из элементов системы генерирует последовательность импульсов возбуждения с различным интервалом следования.

Заметим, что термином «автоволновые импульсы» подчеркивается тот факт, что их характеристики (форма, скорость распространения) определяются, прежде всего, параметрами среды и практически не зависят от начальных и граничных условий. К настоящему времени известны следующие типы автоволновых процессов — бегущие импульсы, стоячие волны, синхронные колебания во всем пространстве, квазистохастические волны, диссипативные структуры (стационарное неоднородное распределение переменных в пространстве [Васильев и др., 1979]). Установлены также спиральные (геликоидальные) автоволны — незатухающие низкочастотные колебания, обусловленные наличием магнитного поля в среде распространения (магнитного поля земного ядра, если речь идет о геосреде) [Давыдов и др., 1991]. Напомним, что термином «диссипативная структура» подчеркивается термодинамический аспект проблемы — диссипативные структуры рождаются и существуют в термодинамических активных системах за счет диссипативных процессов утилизации энтропии и энергии.

Известны разнообразные источники автогенерации волн в активных средах. В частности, в неоднородных средах источником бегущих волн могут быть области, в которых собственная частота колебаний выше, нежели в окружающем их пространстве. Иначе говоря, если имеется область, собственная частота колебаний которой выше, чем в окружающем ее пространстве, то из нее будут распространяться бегущие волны. При наличии в среде нескольких таких источников среда синхронизируется самым высокочастотным из них [Васильев и др., 1979, с. 638]. В итоге формируется и «выживает» наиболее устойчивая, геометрически простая конфигурация со стоячими волнами.

При рассмотрении систем с диссипацией, и в особенности возникновения флуктуаций их параметров, особая роль при-

надлежит знаменитой флуктуационно-диссипативной теореме статистической физики, связывающей спонтанные флуктуации параметров системы с ее диссипативными свойствами [Ландау, Лившиц, 1964; Кадомцев, 1994]. Ее смысл состоит в том, что механизм любой диссипации является одновременно и механизмом рождения флуктуаций. Именно благодаря этому балансу флуктуации в диссипативной системе никогда не исчезают, а поддерживаются на уровне, диктуемом ее дискретностью.

И, наконец, остановимся еще на одном важном аспекте проблемы — учете фрактальной структуры среды [Мухамедов, 1992; Лукк и др., 1996]. Без преувеличения можно сказать, что если вещество не находится в газообразном или кристаллическом состоянии, то оно имеет в некотором диапазоне масштабов фрактальную структуру [Зосимов, Лямшев, 1995]. И хотя на первый взгляд фрактальные свойства, казалось бы, и не относятся к основным параметрам объектов или процессов, наличие фрактальной структуры может принципиально изменить их свойства. В частности, в качестве примера можно указать на отличие упругого поведения фрактальных сред от поведения, описываемого в рамках классической теории упругости сплошных сред, которое состоит в зависимости упругих модулей от масштаба деформации [Зосимов, Лямшев, 1995]. Другое отличие связано с их взаимодействием с электромагнитными волнами: фрактальные системы, как правило, обладают более высокими удельными излучательными параметрами, чем сплошные системы. Иначе говоря, образование фрактальных агрегатов в таких системах резко увеличивает мощность генерируемого ими излучения [Смирнов, 1993]. Другие проявления фрактальных структур в излучении связаны с флуктуациями излучения фрактальных систем [Мухамедов, 1992].

Напомним в этой связи, что излучение фрактальных моделей, с одной стороны, связано с исследованием волновых процессов во фрактальных структурах, а с другой — фрактальных структур, присущих волновым полям. В свою очередь, волновые процессы во фрактальных структурах также можно условно разделить на два типа. Это, во-первых, распространение

волн во фрактальных структурах, когда фрактал — среда распространения. Во-вторых, это рассеяние и излучение волн фрактальными структурами. Большое значение здесь имеет понятие фрактона — локализованного колебательного состояния на фракталах. В частности, теория фрактонов способствует решению проблемы спектра колебаний и условий локализации возмущений [Зосимов, Лямшев, 1995]. Фундаментальным результатом является также то обстоятельство, что эволюция фрактальных систем описывается интегродифференциальными уравнениями нецельного порядка [Нигматуллин, 1992].

Согласно приведенным в данном разделе представлениям и попытаемся далее рассмотреть проблему генерации и распространения электромагнитных флуктуаций литосферного происхождения, дополняя и развивая таким образом существующие подходы к ее решению [Шуман, 2010а,г]. Очевидно, в рассматриваемом контексте подходы, основанные на идеях нелинейной динамики, являются одними из перспективных направлений дальнейших исследований этих явлений. Сложность задач состоит, с одной стороны, в том, что необходимо учитывать возможность различного физического содержания процессов в генерации электромагнитных флуктуаций на разных уровнях геометрически самоподобной блоковой системы, а с другой — в наличие механизмов, трансформирующих энергию колебаний в низкочастотную и высокочастотную области спектра.

Флуктуационно-диссипативный электромагнитный шум литосферы. Как известно, модель геосреды в виде активной блочно-иерархической системы, помимо существенного приближения к реальности с точки зрения описания ее физико-механических свойств, обладает еще одним важным качеством: наличие восходящего потока легких газов и заполненного флюидами межблочного пространства позволяет понять причины многочисленных сейсмоакустических и электромагнитных явлений, наблюдаемых при деформировании горных пород [Садовский, 2004; Гуфельд, 2007]. Изменения структуры, напряженно-деформированного состояния и механических свойств, вызванных блоковыми движениями, определяют, в свою оче-

редь, вариации флюидодинамического режима, режима релаксационных процессов, тепловых и эманационных потоков из недр, условий разделения электрических зарядов и нарушения токовых систем. В геосреде возможно быстрое нарастание процессов в течение коротких промежутков времени, сопровождаемых возникновением контактной разности потенциалов и появлением электрических зарядов на поверхностях пор, капилляров и трещин, образованием двойных электрических слоев. В итоге электродинамика такой самоорганизующей системы оказывается тесно связанной с ее механикой, флюидодинамикой, термодинамикой. Напомним в этой связи: если в течение некоторого промежутка времени система, содержащая электрические заряды, и дипольные источники испытывают перестройку, то в течение этой перестройки система неизбежно излучает электромагнитные волны.

Заметим, что ввиду сложности проблемы в этой области на данном этапе исследования флуктуаций нет достаточно развитых общих подходов, но есть характерные частные примеры. Один из них касается анализа флуктуаций акустической эмиссии в процессах перестройки структуры горных пород [Мухамедов, 1992]. Предполагается, что источниками сейсмоакустической эмиссии являются фронты переупаковки пород или фронты критичности. При этом критическое состояние на фронте возникает самопроизвольно при внешних энергетических воздействиях и в качестве модели фронта самоорганизованного критического состояния предлагается использовать фронты градиентной скалярной перколяции [Гийон и др., 1991].

Один из аспектов перколяции внедрения — акустические шумы, или всплески, возникающие в результате продвижения фронта внедрении по пористой среде. Физически явление можно представить себе следующим образом: внедрение флюида порождает растущий перколяционный кластер, расширение которого происходит нерегулярными скачками, связанными с заполнением трещин, карманов и пор с большим радиусом [Гийон и др., 1991; Мухамедов, 1992]. Заметим, что это универсальный эффект, не требующий каких-либо специфических ус-

ловий образования, а обусловлен только диффузией флюида (реагента).

Другой аспект проблемы — с фронтом самоорганизованной критичности (градиентной перколяции) может быть связано формирование фронта волны (автоволны) тензора комплексной диэлектрической проницаемости, обусловленного появлением, раскрытием и закрытием трещин, изменением структуры порового пространства, перераспределением в нем флюидов, изменением порового давления и другими факторами. Но, как известно, если электрическая проницаемость среды, окружающей заряд, изменяется в пространстве или во времени, возникает переходное излучение (рассеяние) [Гинзбург, Цытович, 1984]. В итоге волны комплексной диэлектрической проницаемости, рассеивающиеся на отдельных зарядах, сгустках зарядов, электрических диполей и других рассеивателях, присутствующих или появляющихся в геосреде в процессе распространения фронта самоорганизованной критичности, порождают электромагнитные, а в принципе, и другие типы волн [Гинзбург, Цытович, 1984].

Заметим, что процесс излучения в нестационарной среде (переходное рассеяние) — это классическое явление, имеющее аналоги и в акустике, и в механике [Денисов, 2007]. Однако для низкочастотных волн диэлектрической проницаемости рассеивания возможно только в том случае, если их частота лежит в области прозрачности среды для электромагнитных волн соответствующей частоты [Гинзбург, Цытович, 1984]. Однако, как известно, в неоднородной среде нет бегущих (распространяющихся) волн — волны являются стоячими [Раутиан, 2006]. Далее, как уже отмечалось, колебательная неустойчивость приводит к образованию стоячих волн [Васильев и др., 1979], что, вообще говоря, меняет существо дела: флуктуационно-диссипативная теорема связывает спонтанные флуктуации параметров системы с ее диссипативными свойствами, в частности спектральную плотность флуктуаций сторонних токов с антиэрмитовой частью тензора диэлектрической проницаемости вещества [Виноградов, Дорофеев, 2009]:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon'_{ij} + i\,\varepsilon''_{ij}\,.$$

Важную роль в генерации таких связанных акустоэлектромагнитных возмущений играет такое фундаментальное свойство геосреды, как нелинейность. Многообразие причин нелинейности можно свести к двум типам. В первом из них нелинейность является «врожденной», т.е. является следствием внутренних причин. Во втором случае нелинейность является «привнесенной». К этому типу обычно относят системы со значительным энерговыделением или энергонасыщением, высокотемпературные процессы, волны со значительной амплитудой. При этом нелинейность может быть либо распределена в объеме среды, либо сосредоточена в ее ограниченной области. Существенное обстоятельство — весьма сильное (на 2—4 порядка!) возрастание акустической нелинейности, обусловленное наличием в структуре среды компонент с резко контрастирующими свойствами. Характерный пример таких «контрастно-мягких» дефектов — это трещины. Понятно, что описание таких сред, в том числе генерации и распространения эмиссий, требует привлечения новых физических и математических моделей с учетом накопленной средой энергии, связей между сейсмоакустическим и электромагнитным полями, между энергетическими параметрами химического потенциала геосреды и ее флюидонасыщенностью [Гуфельд, Матвеева, 2001; Дмитриевский, Володин, 2006; Гуфельд, 2007; Геншафт, 2009].

К новому видению проблемы генерации и распространения электромагнитных флуктуаций привело и появление нового направления в электромагнитной теории — фрактальной электродинамики материальных сред, объединяющей фрактальную геометрию и электромагнетизм [Болотов, 2002; Боголюбов и др., 2009; Потапов, 2009; Тарасов, 2011]. Ее предмет составляет изучение электромагнитных процессов в пространстве, заполненном веществом с фрактальной структурой. К фрактальным структурам обычно относят фрактальные кластеры, фрактальные поверхности, перколяционные кластеры и другие образования, наблюдаемые в эксперименте [Болотов, 2002].

Трудности электродинамического описания фрактальных сред обусловлены зависимостью их макроскопических элек-

тромагнитных параметров — диэлектрической (ε) и магнитной (μ) проницаемостей и проводимости (σ) — от рассматриваемого объема, что делает невозможным применение стандартной модели сплошной среды, в которой они определяются однозначно для физически бесконечно малых объемов. В итоге ключевым элементом здесь является процедура усреднения, построение которой оказывается возможной с использованием фрактальных и мультифрактальных мер [Болотов, 2002; Боголюбов и др., 2009]. Заметим далее, что последовательное определение диэлектрической и магнитной проницаемостей подразумевает однозначное разбиение индуцируемого в среде тока на части, одна из которых ответственна за электрическую поляризацию, а другая — за намагничение [Бредов и др., 1985]. Однако в геосреде, как правило, присутствуют флуктуации материальных свойств различных масштабов. В итоге ток в некоторой точке среды, вообще говоря, может давать вклад в электрическую поляризацию на одном масштабе усреднения и в намагниченность на другом [Виноградов, 2002]. В этом смысле вопрос о многообразии материальных уравнений для сред с фрактальной структурой в некотором диапазоне масштабов известной степени остается открытым. Не известны и сколь-нибудь продвинутые статистические характеристики фрактальных структур, хотя для реальных сред самоподобие и следует понимать в статистическом смысле.

В настоящее время существует несколько направлений в развитии аппарата электродинамики фрактальных сред. Все они основаны на фрактальных (канторовых) мерах [Болотов, 2002; Боголюбов и др., 2009]. Как уже упоминалось, фундаментальным результатом здесь является тот факт, что электромагнитные поля во фрактальных средах в общем случае демонстрируют дробно-степенную релаксацию.

В рассматриваемом контексте изучения механизмов генерации и распространения электромагнитных возмущений в геосреде интерес представляет переходное фрактальное рассеяние, связанное с фрактальностью электродинамических структур [Болотов, 1998; 2002]. Так, в работе [Болотов, 2002] вместо

обычного анализируемого изменения диэлектрической проницаемости по гармоническому закону [Гинзбург, Цытович, 1984]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 \cos\left(\mathbf{k}_0\mathbf{r} - \omega_0 t\right),$$

рассмотрена задача переходного рассеивания всплеска диэлектрической проницаемости вида

$$\varepsilon\left(\mathbf{r}, t\right) = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 \gamma_\xi \left(\mathbf{k}_0\mathbf{r} - \omega_0 t\right)$$

на покоящемся заряде. Здесь ε_0 — невозмущенная диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится заряд; ε_1 — изменение ε, обусловленное прохождением волнового фронта; ω_0 и $\mathbf{k}_0$ — частота и волновой вектор волны; γ_ξ — функция диссипативного всплеска, основная особенность которой — связь ее фурье-представления со множеством Кантора.

Функция Кантора — это ограниченная сверху и снизу монотонная неубывающая функция, постоянная на удаленных из отрезка [0,1] интервалах и меняющаяся скачком в точках канторова дисконтинуума («чертова лестница») [Болотов, 1998, 2002]. Важно, что такой достаточно сложный вид всплеска диэлектрической проницаемости может формироваться, например, ударными волнами, распространяющимся фронтом концентрации флюидной фазы и др. Установлено, что диссипативный всплеск диэлектрической проницаемости рассматриваемого типа при рассеянии на покоящемся заряде формирует широкодиапазонный фрактальный спектр электромагнитного излучения, частота которого сосредоточена в точках множества Кантора («лучевая траектория»). Сама же структура спектра колебаний определяется масштабами, ограничивающими диапазон проявления фрактальных свойств среды и значением спектральной размерности.

Следует заметить, что распространяющийся фрактальный фронт всплеска диэлектрической проницаемости рассматриваемого типа является недифференцируемым и, вообще говоря, не имеет нормали. По этой причине становятся проблематичными или исключаются вообще такие привычные понятия, как «лучевая траектория» или «лучевая оптика». Тем не менее пе-

реходное фрактальное рассеяние, являющееся, очевидно, одним из источников широкополосного электромагнитного излучения, регистрируемого на земной поверхности, может быть использовано для диагностики хаотической динамики геосреды, ее структуры, решения других актуальных задач геологии и геофизики. Видно также, что идеи перколяции и фрактальной геометрии имеют широкий спектр областей применения, отнюдь не сводящихся к вряд ли прямо применимой ситуации стандартной фрактальной геометрии [Гийон и др., 1991].

Правомерна постановка следующего вопроса: имеются ли прямые экспериментальные свидетельства в пользу обоснования предложенной И. Л. Гуфельдом концепции динамически неустойчивой геосреды? Очевидно, ответ должен быть положителен, хотя, разумеется, в проблеме планетарной дегазации Земли следует различать ряд существенных обстоятельств, отличающих поведение горных пород в естественном залегании от лабораторных экспериментов на их образцах [Гуфельд, 2007; Гуфельд, Матвеева, 2011].

Как свидетельствует лабораторный эксперимент, при имплантации легких газов в горные породы в них происходят структурные перестройки и аморфизация структуры, формируется газовая пористость, изменяются физико-механические свойства [Гуфельд, Матвеева, 2011]. Они оказываются весьма чувствительными к парциальному давлению легких газов в окружающем пространстве и к распределению их в кристаллической структуре и газовых порах. Общим следствием имплантации легких газов является формирование внутреннего напряженного состояния, проявляющегося в эффектах ползучести и изменении объема [Гуфельд, 2007].

Следует упомянуть также результаты исследований по генерации акустической эмиссии при разрушении насыщенного водородом металлического образца, выполненные Gannelli G., Cantelli R., Corsero A. (Phys. Rev. Lett. 70. 3923, 1993), приведенные в обзоре [Зосимов, Лямшев, 1995]. Насыщение образца водородом осуществлялось при высокой температуре, а его разрушение (образование микротрещин) происходило в результа-

те охлаждения. В частности, установлено распределение амплитуд импульсов акустической эмиссии вида $N=A^{-0,9}$, причем такая зависимость выполнялась на интервале значений амплитуд более чем в два порядка.

Заметим, что как в лабораторных, так и в натуральных экспериментах по регистрации электромагнитной эмиссии обычно ограничиваются измерением числа импульсов в единицу времени (обычно 1 с). Такой способ измерений имеет определенные преимущества по сравнению с измерением интенсивности сигнала (его огибающей), поскольку он чувствителен к изменению количества излучателей в среде. Однако при регистрации интегральной интенсивности потока импульсов не удается идентифицировать реальный вид высокочастотного сигнала, что затрудняет изучение механизма его генерации и расположения источников в среде. Отсутствует также анализ фрактальных параметров системы, информация об ее архитектуре и принципах межсистемных взаимодействий, что существенно снижает эффективность ее диагностики и затрудняет понимание протекающих в ней процессов.

О взаимодействии свободных зарядов геосреды с электромагнитным полем. В свете упомянутых представлений о геосреде как своеобразной электродинамической системе, механизмах генерации и распространения в ней электромагнитных возмущений, представляется уместным рассмотреть более подробно особенности взаимодействия присутствующих в геосреде зарядов с электромагнитным полем.

Как известно, задача о взаимодействии электромагнитного поля с веществом должна быть самосогласованной, т. е. учитывать воздействие поля на вещество, и наоборот, вещества на поле. Последнее обстоятельство в классической электродинамической теории обычно учитывается путем введения материальных констант — диэлектрической и магнитной проницаемости, показателя преломления, линейной восприимчивости. Эти константы (или тензоры), вводимые феноменологически, и позволяют решать задачи о распространении электромагнитного поля в материальной среде [Бредов и др., 1985].

В том случае, если представляется целесообразным разделить наведенные в среде токи на ток свободных носителей, ток поляризации связанных зарядов и вихревой ток намагничения, удобно ввести векторы электрической индукции $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)=\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)+4\pi\mathbf{P}(\mathbf{r}, t)$ и напряженности магнитного поля $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)=\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)-4\pi\mathbf{M}(\mathbf{r}, t)$. При этом в поляризации среды $\mathbf{P}(\mathbf{r}, t)$ можно учесть вклад токов свободных и связанных носителей или только вклад тока связанных носителей, выделяя ток свободных носителей заряда. Тогда вектор намагниченности будет определять вихревые токи, а система уравнений Максвелла в среде может быть записана в форме [Бредов и др., 1985]

$$\mathrm{rot}\mathbf{E}(\mathbf{r},t)=-\frac{1}{c}\frac{\partial\mathbf{B}(\mathbf{r},t)}{\partial t},\ \mathrm{div}\mathbf{B}(\mathbf{r},t)=0,$$

$$\mathrm{rot}\mathbf{H}(\mathbf{r},t)=\frac{1}{c}\frac{\partial\mathbf{D}(\mathbf{r},t)}{\partial t}+\frac{4\pi}{c}\mathbf{J}_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r},t),$$

$$\mathrm{div}\mathbf{D}(\mathbf{r},t)=4\pi\rho_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r},t). \qquad (1)$$

где $\mathbf{J}_{\mathrm{exp}}(\mathbf{r}, t)$ — сторонние токи, которые могут быть обусловлены и неэлектромагнитными явлениями. Индуцированные токи и заряды в общем случае являются функционалами напряженностей полей, которые, в свою очередь, определяются суммой индуцированных и сторонних токов и зарядов. Используя далее разложение Фурье и считая, что все интегралы и производные полей в уравнениях Максвелла понимаются в смысле сходимости по вероятности или в среднем квадратичном:

$$\mathbf{A}(t)=\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{d\omega}{2\pi}A(\omega)\exp(-i\omega t),$$

где $\mathbf{A}=\mathbf{E}$, $\mathbf{H}$, $\mathbf{D}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{J}$, ρ, система (1) для спектральных амплитуд примет вид

$$\mathrm{rot}\mathbf{E}(\mathbf{r},\omega)=\frac{i\omega}{c}\mathbf{B}(\mathbf{r},\omega),\ \mathrm{div}\mathbf{B}(\mathbf{r},\omega)=0,$$

$$\mathrm{rot}\mathbf{H}(\mathbf{r},\omega)=-\frac{i\omega}{c}\mathbf{D}(\mathbf{r},\omega)-\frac{4\pi}{c}\mathbf{J}_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r},\omega),$$

$$\mathrm{div}\mathbf{D}(\mathbf{r},\omega) = 4\pi\rho_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r},\omega)\,. \tag{2}$$

Как известно, уравнение движения электрона (или иной заряженной частицы) в электромагнитном поле имеет вид

$$\frac{dp}{dt} = e\mathbf{E}(\mathbf{r},t) + \frac{e}{c}\left[\mathbf{v}\times\mathbf{H}(\mathbf{r},t)\right], \tag{3}$$

где p — импульс электрона.
Для скоростей $v<<c$ имеем

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}\,,\ v = \frac{d\mathbf{r}}{dt}\,,$$

$$m\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = e\mathbf{E}(\mathbf{r},t) + \frac{e}{c}\left[\mathbf{v}\times\mathbf{H}(\mathbf{r},t)\right]. \tag{4}$$

Следуя работе [Ильинский, Келдыш, 1989], проанализируем поведение свободного заряда в поле стоячей волны, положив

$$\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = \mathbf{E}(\mathbf{r})\cos\omega t\,,\ \mathbf{H}(\mathbf{r},t) = \mathbf{H}(\mathbf{r})\sin\omega t\,. \tag{5}$$

Ограничиваясь в уравнении (4) только членами первого порядка по v/c, когда силой Лоренца можно пренебречь и не учитывать зависимость электрического поля от координаты электрона $\mathbf{r}$, после усреднения приходим к уравнению [Ильинский, Келдыш, 1989]:

$$m\frac{d^2\mathbf{r}}{dt} = -\frac{e^2}{4\pi\omega^2}\nabla\mathbf{E}^2(\mathbf{r})\,,$$

из которого следует, что на электроны в среднем действует сила, выталкивающая их из области максимальных значений поля, что ведет к их локализации в областях узлов электрического поля.

В случае движения электрона в поле бегущей волны

$$\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = E\cos(\omega t - kz)\mathbf{e}_x\,,$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r},t) = H\cos(\omega t - kz)\mathbf{e}_y\,,$$

где $\mathbf{e}_x$, $\mathbf{e}_y$ — единичные векторы поляризации вдоль осей x, y, уравнение движения электрона (4) в координатной форме примет вид [Ильинский, Келдыш, 1989]

$$m\ddot{x} = eE\left(1 - \frac{v_z}{c}\right)\cos(\omega t - kz)\,,\ m\ddot{y} = 0\,,$$

$$m\ddot{y} = \frac{ev_x}{c}E\cos\left(\omega t - kz\right). \qquad (6)$$

В нулевом приближении ускорение электрона направлено по оси *v/c*. Электрон при этом совершает колебание вдоль оси *x* и излучает с интенсивностью

$$\varepsilon = \frac{1}{3c^3}\left|\frac{e^2\mathbf{E}}{m}\right|^2.$$

В следующем порядке по *v/c* с учетом силы Лоренца в уравнении движения по оси *z*

$$m\ddot{z} = \frac{e^2E^2}{m\omega c}\cos\omega t\sin\omega t = \frac{e^2E^2}{2m\omega c}\sin 2\omega t\,.$$

Следовательно, в первом приближении по *v/c* электрон колеблется вдоль оси *z* с удвоенной частотой 2ω. В целом же, с учетом колебаний по оси *x*, он описывает восьмерку в плоскости *xz*.

Ситуация существенно изменяется при наличии подмагничивающего поля $\mathbf{H}_0$. В этом случае, считая электроны в среде свободными и пренебрегая ее магнитными свойствами, уравнение движения для электронов (4) может быть записано в виде

$$m\ddot{\mathbf{r}} = e\mathbf{E} + \frac{e}{c}v\times\mathbf{H}_0\,, \qquad (7)$$

где $\mathbf{E}$ — электрическое поле электромагнитной волны, а $\mathbf{H}_0$ — постоянное и однородное подмагничивающее поле (поле земного ядра). Полагая далее, что волновой вектор поля параллелен вектору $\mathbf{H}_0$, проектируя уравнение движения на оси координат и решая эти уравнения, приходим к следующему выражению для диэлектрической проницаемости среды распространения [Бредов и др., 1985, с. 338]:

$$\varepsilon_{\pm} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega\left(\omega_{\pm}\omega_c\right)}\,, \qquad (8)$$

где $\omega_n \sqrt{4\pi n e^2/m}$ — плазменная частота, n — концентрация электронов, $\omega_c = eH_0/mc$ — циклотронная частота.

Из уравнения (8) следует, что при условии $\omega<\omega_c\varepsilon_+>1$ и является действительной величиной. В этом случае в среде может распространяться волна с соответствующей циркулярной поляризацией. Ясно, что такая волна является в этом частотном диапазоне слабозатухающей. Это означает, что бесстолкновительное затухание сильно подавлено, так как магнитное поле $\mathbf{H}_0$, искривляя траекторию движения электронов, препятствует их длительному нахождению в фазе с волной. Такие слабозатухающие относительно низкочастотные колебания, всецело обусловленные наличием подмагничивающего поля $\mathbf{H}_0$ в среде распространения, получили название геликоидальных (спиральных) электромагнитных волн. Эти соображения представляются важным также с точки зрения возможности формирования и распространения в геосреде геликоидальных автоволн.

Как уже отмечалось, возможность их распространения на расстояния, значительно превосходящие мощность скин-слоя, с точки зрения теории и нормальных волн связано с двумя факторами — наличием в среде распространения немонотонной зависимости фазовой скорости с глубиной и возможностью раскрытия промежуточного «дисперсионного» окна [Шуман, Богданов, 2008]. Его появление — экспериментальный факт.

Заключение. Исследование геомагнитных флуктуаций стало важным элементом современной фундаментальной и прикладной геофизической науки. В частности, можно указать на принципиальную возможность использования регистрируемых на земной поверхности геомагнитных пульсаций для гидромагнитной диагностики (определения свойств магнитосферной и ионосферной плазмы), геофизической разведки (методы магнитотеллурического и магнитовариационного зондирования и профилирования). Многолетний опыт изучения естественного электромагнитного излучения позволил приступить к решению проблемы поиска аномальных возмущений и флуктуаций, связанных с сейсмической активностью, проведения исследований физических процессов, сопровождающих подготовку сейсмических событий на различных фазах.

Существенно, что процессы и механизмы генерации и распространения электромагнитных возмущений весьма разнообразны. Очевидно, реально в природе работает совокупность ряда физических механизмов. Неудивительно, что в столь сложной ситуации весьма проблематично представить себе и модель геосреды, одинаково пригодную «на все случаи жизни». Однако вошло в норму и стало уже традицией рассматривать литосферу в качестве пассивного континуума. И такой подход вполне оправдан во многих случаях, но далеко не всегда. В частности, он эффективен при анализе возмущений, источники которых находятся над земной поверхностью. Он вполне приемлем также при изучении части электромагнитных возмущений литосферного происхождения. При этом достаточно сильное частотнозависимое поглощение электромагнитного излучения в проводящих слоях земной коры ориентирует эксперимент на активное использование двух возможных диапазонов наблюдений:

ОНЧ (VLF) — излучений с частотами от сотен Гц до первых мГц, источники которого, как предполагают, находятся в верхних приповерхностных слоях земной коры;

СНЧ (ULF) — возмущений с частотами от 10 Гц до 30 кГц, источники которых, в принципе, могут располагаться на значительно большей глубине, включая и области очагов возможных сейсмических событий.

Однако, как достаточно убедительно свидетельствует обширный полевой эксперимент последних лет, такая трактовка не является исчерпывающей. Существует и другая компонента геомагнитного литосферного происхождения, которая не поддается адекватной трактовке в рамках классических представлений. Имеются весомые основания назвать ее флуктуационно-диссипативным электромагнитным шумом литосферного происхождения. Его существование всецело обусловлено и ассоциируется с представлениями о геосреде как активной открытой неравновесной системе со множеством самоорганизующихся структур, в которой идут необратимые диссипативные процессы. Эта компонента излучений может рассматриваться в качестве нелинейного отклика геосреды на относительно малые

изменения ее параметров и внешние воздействия. В настоящее время известны разнообразные источники автогенерации волн в активных средах. Для описания и понимания свойств и механизмов генерации и распространения этого типа электромагнитного шума как естественного физического явления, не требующего специальных условий возникновения, определяющее значение имеет флуктуационно-диссипативная теорема статистической физики, связывающая спонтанные флуктуации системы с ее диссипативными свойствами. Именно за счет этого баланса флуктуации в системе никогда не исчезают и поддерживаются на уровне, определяемой ее дискретностью. Далее, если в такой среде имеется пространственная область, собственная частота колебаний выше, чем в окружающей среде, то из нее неизбежно будут распространяться, в том числе и электромагнитные волны, а в случае нескольких таких источников среда синхронизируется самым высокочастотным из них.

Фракталы способствуют пересмотру взгляда на геометрические свойства объектов в геосреде, а динамический хаос вносит существенные изменения в понимание того, как эти объекты могут вести себя во времени. Нетипичные нелинейные явления в таких структурно-неоднородных средах — это наличие доминантных частот и механизмов, переносящих энергию колебаний в низкочастотную или высокочастотную области спектра. При этом достаточно располагать источником энергии, чтобы самовозбуждение флуктуаций стало возможным.

Как известно, модель фронта градиентной перколяции позволяет дать физическую интерпретацию наблюдаемых параметров сейсмоакустического шума как неравновесного самоорганизованного критического явления. Очевидно, ассоциируемый с этим фронтом диссипативный всплеск диэлектрической проницаемости при рассеивании на покоящихся или движущихся зарядах, сгустках зарядов или диполях, содержащихся или появляющихся при этом в геосреде, в свою очередь формирует широкодиапазонный фрактальный спектр электромагнитного излучения. Существенно, что этот распространяющийся фрактальный фронт (всплеск) диэлектрической проницаемости

недифференцируем и, вообще говоря, не имеет нормали. По этой причине становятся проблематичными такие понятия, как «лучевая траектория» или «лучевая оптика». Заметим также, что в случае реальных фрактальных сред (в частности, геосреде) имеется обычно некий максимальный масштаб, ограничивающий область их фрактального поведения. При этом на масштабах, превышающих его, и, следовательно, на низких частотах имеют место обычные закономерности распространения, в том числе и обычный спектр излучений.

Подчеркнем еще раз: сейсмоакустический и электромагнитный шумы литосферного происхождения — это универсальный эффект, не требующий каких-либо специальных условий образования фрактальных объектов. Он обусловлен наличием диффузии. Отчетливо видны и трудности его аналитического описания. Очевидно, это — отсутствие понимания архитектуры геосреды в рассматриваемой конкретной области исследований и принципов межсистемных взаимодействий.

И, наконец, возвращаясь к эпиграфу, заметим, что ключевой его элемент — это словосочетание «скорее всего». Очевидно, безоговорочно принимая подобную точку зрения, весьма затруднительно выйти за рамки задач, имеющих, на первый взгляд, простые решения. Понятно, что при истолковании всей совокупности сигналов, регистрируемых на земной поверхности, мы никогда не можем быть уверенными в том, что не пренебрегли чем-то весьма существенным: они могут быть обусловлены как внутренними свойствами системы, так и внешними факторами, в том числе рождаться универсальными путями, независимо от природы системы. Их мир поистине разнообразен и удивителен, а разработанные методы их анализа позволяют получать информацию о строении геосреды и в отдельных случаях предсказывать ее дальнейшую эволюцию. Неудивительно, что данное направление исследований приобретает в геофизических исследованиях все большую популярность.

Электромагнитно-акустические преобразования и высокоразрешающие зондирующие системы: новые возможности и новые формулировки старых вопросов

Геофизический журнал,
№ 3, Т. 34, 2012, С. 32—39.

Введение. В настоящее время можно отметить три направления нестационарной геоэлектрики, в которых отмечается интенсивное развитие методов с контролируемым возбуждением поля, сопровождаемое интенсивным потоком публикаций (см., например, [Светов и др., 1996; Небрат, Сочельников, 1998; Каменецкий, 1999; Черяука, Мартаков, 1999; Могилатов, 2002; Могилатов, Балашов, 2005; Шуман, 1997, 2001, 2009; Шуман и др., 2008] и цитируемую там литературу). Первое из них связано с появившейся на рубеже 90-х годов прошлого века технологией регистрации электромагнитного отклика в очень раннем (сверхраннем) диапазоне времен, начиная с десятков наносекунд и шагом 2—5 нс, оказавшейся возможной благодаря современной измерительной технике. Второе ассоциируется с наличием особенностей на переходных характеристиках, не находящих объяснения в рамках классической электродинамики сплошных сред. Это относительно низкочастотные (0,2—0,5 Гц) и более высокочастотные (5—2500 Гц) осцилляции. В качестве возможных механизмов их появления и «выхода» к точкам регистрации отклика на дневной поверхности обычно

рассматривается два. Это частотная дисперсия электромагнитных параметров геосреды и возможность появления высокочастотного «окна» (высокочастотного режима зондирования), теоретически обнаруженного в идеализированной материальной среде без дисперсии [Габийяр и др., 1972; Шуман, Причепий, 2004], в пределах которого не происходит сильного поглощения электромагнитных возмущений соответствующего спектрального состава. При этом наиболее часто для аппроксимации частотной зависимости используется модель Cole-Cole [Уэйт, 1987; Светов и др., 1996; Каменецкий, 1999]. Третье — зондирование вертикальными токами — определяется сочетанием идеи использования нестационарного поля электрического типа с новым типом источника — круговым электрическим диполем [Могилатов, 2002; Могилатов, Балашов, 2005]. В этом методе решаются две взаимосвязанные задачи — устранение мощного динамического фона от вмещающей среды и реализация площадных работ с закрепленным источником.

Как известно, структура электромагнитного отклика, возбуждаемого локальным источником (магнитным или электрическим диполем, линией конечной длины) в нижнем проводящем полупространстве и на его поверхности формируется за счет двух типов возбуждения. Возбуждение первого рода, по терминологии А. Зоммерфельда и В. А. Фока, распространяется от источника до пункта регистрации, не покидая проводящей среды. Возбуждение второго рода распространяется вдоль границы раздела «земля—воздух» и непрерывно ответвляется от нее в проводящую среду (латеральная или «боковая» волна [Кинг, Смит, 1984]). Напомним также, что переходной процесс допускает различные способы его аналитического представления. В частности, он может быть представлен либо в виде суперпозиции стационарных составляющих, либо в виде суммы интегралов, каждый из которых соответствует определенной сингулярности отклика [Mahmoud et al., 1979]. При этом глубина проникновения поля в проводящую среду является, по существу, единственным наиболее важным фактором, определяющим ка-

чественные динамические свойства отклика, описываемого уравнением диффузии.

Заметим, что задача теоретического описания ранних стадий процесса становления поля оказалась значительно сложнее ее аналога в квазистационарной (диффузионной) области, где квазистационарность предполагалась уже на стадии постановки соответствующей краевой задачи [Могилатов, 2002]. Очевидно, что основная причина усложнений состоит в смене типа уравнений. Это означает, что численные расчеты в квазистационарном приближении (без учета токов смещения) реализуются относительно просто, а при их учете сильно затруднены. В частности, расчет электромагнитного отклика, возбуждаемого сосредоточенным источником с током, меняющимся по закону импульса Хэвисайда, хотя, в принципе, и возможен, однако сильно осложнен тем обстоятельством, что в силу отмеченных выше условий фронты всей совокупности прямых, отраженных и рефрагированных волн имеют вырожденные носители и бесконечные амплитуды [Черяука, Мартаков, 1999]. В итоге, к сожалению, мы все еще не имеем аналитической теории, способной в деталях проанализировать процесс становления поля во всем возможном диапазоне времен, хотя имеющиеся теоретические наработки и позволяют в общих чертах представить себе процесс становления и возникающие ограничения.

Уместно также напомнить, что ни одно из используемых в настоящее время уравнений не дает исчерпывающего описания процесса распространения электромагнитных возмущений в реальной геосреде — диссипативной неравновесной многофазной системе. Измерение и эксперимент в такой среде, очевидно, не являются полностью формализованными операциями: особенности переходного процесса в геосреде не исчерпываются в рамках упомянутых подходов. Ясно также, что его исследование в расширенном временном интервале требует более углубленной электродинамической проработки [Шуман, 2009], включая конкретизацию базовой модели геосреды и средств ее описания. Разумеется, новые идеи и подходы вовсе не исключают и не заменяют стандартные постановки задачи с исполь-

зованием классической базовой модели геосреды — слоистой одномерной структуры с кусочно-постоянным значением ее электромагнитных характеристик. В этом контексте важное методическое значение имеет предложенная в работах [Москвичев, 1989; Гололобов и др., 1995] электродинамическая модель взаимодействия электромагнитных возмущений с геологической средой, базирующаяся на существовании в ней свободных носителей зарядов (в частности, над залежами углеводородов) и их перемещении к дневной поверхности в присутствии постоянного магнитного поля земного ядра. Однако такая электродинамическая система с плазменным компонентом, приобретающая благодаря подмагничивающему полю $\mathbf{H}_0$ анизотропные свойства, позволяет использовать для изучения ее взаимодействия с электромагнитным полем как кинематический, так и гидродинамический подходы [Пикельнер, 1966; Платман, Вольф, 1975; Бредов и др., 1985; Виноградова и др., 1979].

В работе [Шуман, 2009] предпринята попытка конкретизации некоторых из упомянутых идей в описании такого взаимодействия, включая уточнение и конкретизацию базовой электродинамической модели, которые позволяют описать и понять некоторые экспериментальные ситуации, имеющие место в условиях земной коры. Заметим, что явление скин-эффекта, составляющее фундаментальную основу электромагнитных зондирующих систем, может быть интерпретировано как отклик электронно-ионного «газа» в фоновой геосреде на внешнее переменное электромагнитное поле. Очевидно, что процесс распространения электромагнитных возмущений в такой среде происходит с конечной скоростью и характеризуется наличием резонансных частот [Гололобов и др., 1985; Шуман, 2009]. Коснемся теперь более детально этой стороны проблемы, выходя за рамки чисто электродинамического описания, опираясь на электромагнитно-акустические и акустоэлектромагнитные трансформации в среде и на границе раздела «земля — воздух » в присутствии подмагничивающего поля Земли $\mathbf{H}_0$.

Электромагнитно-акустическое и акустоэлектромагнитное преобразования на границе проводника. Как известно, явле-

ние взаимной трансформации электромагнитных и упругих полей в материальной среде является на протяжении последних десятилетий предметом интенсивного экспериментального и теоретического изучений [Конторович, Глуцюк, 1961; Кравченко, 1968; Васильев, Гайдуков, 1983; Каганов, Васильев, 1993]. Эти процессы представляют собой самостоятельное и быстроразвивающееся направление физики твердого тела. В частности, установлено, что в широком диапазоне частот, магнитных полей и температур имеют место различные механизмы бесконтактного преобразования электромагнитных и звуковых волн на границе металла, объединяемые общим понятием электромагнитно-акустического преобразования (ЭМАП). Согласно работе [Каганов, Васильев, 1993], суть ЭМАП состоит в том, что в среде, не обладающей ни пьезоэлектрическими, ни магнитострикционными свойствами, под действием падающей электромагнитной волны возбуждаются ультразвуковые волны той же или кратной частоты. При этом граница раздела сред как место сосредоточения источника возбуждения имеет принципиальное значение.

Нетривиальность этого преобразования как физического явления, определяется рядом обстоятельств. Во-первых, электромагнитная волна, падающая на границу раздела, возбуждает акустические колебания электрически нейтрального тела. Во-вторых, число механизмов, обеспечивающих взаимное преобразование электромагнитных и акустических волн в металлах, велико. И, в-третьих, ряд эффектов, наблюдаемых при изучении чисто акустических свойств (затухания и скорости распространения ультразвука) проявляются иногда более отчетливо и выразительно в ЭМАП. Последнее обстоятельство существенно при разработке методов неразрушающего контроля [Комаров, 1986].

Как уже отмечалось, в широком диапазоне частот и магнитных полей имеют место различные механизмы бесконтактного преобразования электромагнитных и звуковых волн на границе металла [Васильев, Гайдуков, 1983; Каганов, Васильев, 1993]. Тем не менее они могут быть рассмотрены в рамках единого

подхода, основанного на анализе сил, действующих на кристаллическую решетку металла. Полная система уравнений, описывающая эти процессы, включает уравнения Максвелла, кинетическое уравнение для электронной функции распределения, уравнения упругости с учетом сил, действующих на решетку со стороны электронов, а также граничные условия на поверхности металла.

Плотность силы, действующей на кристаллическую решетку металла, в первом приближении можно представить в виде трех слагаемых [Каганов, Васильев, 1993]:

$$\mathbf{F} = \mathbf{f}_{\mathrm{ST}} + \mathbf{f}_{\mathrm{L}} + \mathbf{f}_{\mathrm{def}} . \qquad (1)$$

Первое из них — сила Стюарта—Толмена:

$$\mathbf{f}_{\mathrm{ST}} = \frac{m}{e}\frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t} = -\frac{i\omega m}{e}\mathbf{j}, \qquad (2)$$

где m и l — масса и заряд электрона, ω — частота, $\mathbf{j}$ — плотность тока.

Второе — сила Лоренца:

$$\mathbf{f}_{\mathrm{L}} = \left[\mathbf{j} \times \mathbf{H}_0\right] / c , \qquad (3)$$

где c — скорость света в вакууме, проявляющаяся лишь в постоянном подмагничивающем поле $\mathbf{H}_0$. Она зависит от соотношения глубины скин-слоя и длины упругой волны.

Третье — это плотность деформационной силы.

Роль различных компонент силы $\mathbf{F}$ в процессах электромагнитно-акустического преобразования зависит от многих факторов и параметров задачи (частоты, магнитного поля $\mathbf{H}_0$, температуры и др.)

Общей чертой стюарт-толменовского и лоренцова взаимодействий является то, что они выражаются через плотность переменного тока, возбуждаемого в скин-слое падающей на границу раздела электромагнитной волной.

Характеристиками ЭМАП обычно служат амплитуда возбуждаемого ультразвука и эффективность преобразования τ, определяемая отношением потоков энергии в упругой и элек-

тромагнитной волнах. Обычно величина τ находится в пределах 10^{-8}—10^{-12}, причем наиболее интенсивная генерация происходит в присутствии постоянного магнитного поля $\mathbf{H}_0$. При этом интенсивность ЭМАП за счет деформационного и стюарт-толменовского механизмов, как правило, существенно ниже эффективности ЭМАП в случае индукционного. Эти оценки при нормальном падении электромагнитной волны на поверхность металла в первом приближении могут быть получены из следующих простых соображений [Васильев, Гайдуков, 1983].

В случае возбуждения как продольного, так и поперечного звуков для плоских монохроматических волн уравнение вынужденных звуковых колебаний, распространяющихся от границы раздела, может быть записано в виде

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} - S^2 \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z^2} = \frac{1}{\rho c}\left[\mathbf{j} \times \mathbf{H}_0\right], \qquad (4)$$

где ζ — вектор смещения, s — скорость звука в металле, ρ — его плотность, c — скорость света.

Полагая далее, что электромагнитное поле изменяется пропорционально $\exp i(\omega t - kz)$, выпишем выражение для плотности переменного тока в скин-слое:

$$\mathbf{j}(z,t) = \frac{(1+i)c}{4\pi\delta}\,\mathbf{H}\exp\left[-(1+i)\frac{z}{\delta}\right]e^{i\omega t}, \qquad (5)$$

где $\mathbf{H}$ — амплитуда падающего переменного магнитного поля, $\delta = c\sqrt{2\pi\omega\sigma}$, σ — проводимость металла, ω — частота.

Подставим выражение (5) в волновое уравнение (4). На расстояниях, превышающих мощность скин-слоя, решение уравнения (4) имеет вид [Васильев, Гайдуков, 1983]

$$|\zeta| = \frac{H_0 H}{4\pi\rho s\omega}\,\frac{1}{\sqrt{1+\beta^2}}, \qquad (6)$$

где $\beta = q^2\delta^2/2$, $q = 2\pi/\lambda$, λ — длина звуковой волны.

Соответственно, эффективность трансформации τ, определяемая как отношение потока звуковой энергии $\rho s\omega^2\zeta^2/2$ к сред-

ней величине вектора Пайнтинга электромагнитной волны на поверхности металла $\omega\delta H^2/16\pi$, равна

$$r = \frac{H_0 H}{2\pi\rho s\omega\delta}\ \frac{1}{1+\beta^2}\,. \qquad (7)$$

Однако экспериментально определяемая величина эффективности τ, как правило, существенно превышает теоретическую оценку (7).

ЭМАП и геосреда. Рассмотрим далее некоторые особенности прямого и обратного ЭМАП в ситуации, более соответствующей постановке возможного натурного эксперимента, когда электромагнитное поле возбуждается катушкой индуктивности или петлей, расположенными у границы раздела «земля—воздух», и этой же катушкой или петлей осуществляется регистрация электромагнитного отклика за счет обратного ЭМАП после выключения тока в источнике. В этом случае оказывается возможным не только безконтактное возбуждение звуковых волн в геосреде, но и бесконтактное получение информации о скорости их распространения и структуре поля. В ней при этом, вследствие низкой скорости распространения, акустические волны обладают очень малыми длинами волн по сравнению с электромагнитными волнами той же частоты. В принципе, это позволяет существенно повысить разрешающую способность зондирующей системы, основанной на их регистрации. Очевидно, явление прямого и обратного электромагнитно-акустического преобразования может быть для этого весьма перспективным. Основное препятствие на пути реализации этой идеи — это низкая эффективность генерации ультразвука в геосреде и генерации ультразвуком электромагнитного сигнала.

Действительно, вследствие высокой отражательной способности проводника лишь небольшая доля энергии электромагнитной волны, падающей на его поверхность, диссипируется в нем в пределах скин-слоя и, естественно, еще меньшая часть превращается в энергию акустических колебаний и обратно — в энергию электромагнитного поля. Однако в некоторых част-

ных случаях это взаимодействие полей становится достаточно сильным.

В частности установлено, что с точки зрения интенсивности возбуждаемого бесконтактным методом звукового поля наиболее выгодна генерация стоячих звуковых волн в горизонтально-слоистой структуре [Васильев, Гайдуков, 1983]. Здесь установление стоячих звуковых волн в слое сопровождается появлением резонансных особенностей на частотной зависимости поверхностного импеданса. Существенно, что сопутствующее стоячей звуковой волне электромагнитное поле столь же слабо, как и звуковое, затухающее в среде, может в условиях резонанса обладать заметной амплитудой [Кравченко, 1968].

Заметим, что в общем случае упругое поле содержит как компоненты, сосредоточенные в пределах скин-слоя, так и волну, бегущую от границы раздела со звуковой скоростью. При этом если вектор $\mathbf{H}_0$ направлен вдоль граничной поверхности, генерируется продольный ультразвук, а в случае ориентации $\mathbf{H}_0$ по нормали к ней — поперечный.

Второе важное обстоятельство, влияющее на эффективность прямого и обратного ЭМАП — это специфические свойства и особенности геосреды, которые могут сильно изменить отмеченные ранее соотношения основных механизмов ЭМАП, в частности стюарт-толменовского и лоренцова. Как известно, горные породы — это пористые образования, полностью или частично насыщенные раствором электролита. В такой среде заряд переносится преимущественно ионами, а не электронами. Однако, имея ввиду эффект Стюарта—Толмена, по мнению А. В. Гульельми, было бы ошибкой заменить массу электрона в формуле (2) на массу иона: при ускорении твердого скелета горной породы происходит кажущееся увеличение инертной массы носителей заряда [Гульельми, 2007, с. 1258]. Понятно, что присоединенная масса значительно превышает массу иона проводимости. Согласно выполненным А. В. Гульельми оценкам, присоединенная масса равна массе жидкости, заполняющей поры, в объеме диска радиусом порядка среднего радиуса поры и толщиной порядка дебаевского радиуса. По этой причине ве-

личина коэффициента механомагнитной трансформации α в условиях земной коры больше, чем в механическом проводнике (в котором $\alpha = -m_e c/e$, m_e — масса электрона) примерно на восемь (!) порядков [Гульельми, 2007, с. 1258].

Это обстоятельство кардинально меняет существо дела, переводя эти трансформации в разряд измеримых (обнаруживаемых) существующими техническими средствами геоэлектрики.

ЭМАП и зондирующие системы. Итак, с точки зрения приложений можно сказать, что преобразователем электромагнитной и упругой энергий в ЭМАП выступает скин-слой проводника. Как уже отмечалось, глубина проникновения поля δ для однородного проводника определяется формулой

$$\delta(\omega) = \sqrt{2/\mu_0 \sigma \omega}\,.$$

Эквивалентное выражение во временной области имеет вид

$$\delta(t) = \sqrt{2t/\mu_0 \sigma}\,,$$

где δ — глубина, на которой поле уменьшается в e раз по сравнению с его значением на поверхности проводника.

Очевидно, в каждый момент времени t после включения (выключения) источника, информация о разрезе поступает не из всего нижнего полупространства, а из некоторого пласта, ограниченного мощностью скин-слоя $\delta(t)$, поскольку она определяет размер области, существенной для поля. Что касается скин-эффекта в слоистой среде, то он имеет довольно сложный характер. Понятие «мощность скин-слоя» в этом случае становится противоречивым, так как различные (электрические или магнитные) компоненты поля затухают в e раз быстрее или медленнее для каждого момента времени на разных глубинах [Бердичевский, Дмитриев, 1991]. Для произвольных трехмерных распределений удельной проводимости σ глубина проникновения, вообще говоря, определяет поверхность, которая при заданной частоте или времени становления и конкретном источнике возбуждения делит нижнее полупространство на области со значительной и незначительной (экспоненциально ма-

лой) напряженностью поля [Некут, Спис, 1989]. Простой способ сохранить удобное понятие «мощность скин-слоя» для неоднородной среды в заданный момент времени становления — это определить его как толщину скин-слоя в однородном полупространстве с проводимостью σ_τ, равную кажущейся проводимости для этого момента времени [Исаев, Филатов, 1981].

Далее, формируя различные конфигурации электромагнитных полей у границы раздела «земля—воздух», можно возбуждать в нижнем проводящем полупространстве не только объемные упругие волны, распространяющиеся под любым углом к ней, но и различные типы поверхностных акустических волн. В результате ЭМАП в пределах скин-слоя формируются интенсивные продольные колебания — звуковые стоячие волны, когда на толщине h геоэлектрического горизонта (слоя) укладывается целое число длин волн ультразвука λ, электромагнитное поле которых регистрируется тем же преобразователем. Отклик этого слабозатухающего в среде поля при пространственном резонансе $h=n\lambda/2$, $n=1, 2,\ldots$, очевидно имеет немонотонный характер, т. е. особенности, всплески в переходном режиме или на соответствующих частотах в гармоническом. Напомним, что с понижением частоты мощность скин-слоя возрастает пропорционально $\omega^{-1/2}$, в то время как длина звуковой воны $\lambda \sim \omega^{-1}$.

Обратим внимание на важное обстоятельство — в неоднородных средах, вообще говоря, нет распространяющихся волн, волны являются стоячими [Раутиан,2008]. Колебания с длинами волн, кратных характерному размеру неоднородностей (к примеру, блоков или мощностей слоев), затухают значительно слабее волн, длина которых такова, что в них не могут возникнуть стоячие волны. В итоге слоистая среда с ростом скин-глубины ведет себя подобно набору резонаторов. Соответственно, резонансное прямое и обратное ЭМАП является источником возмущений электромагнитного отклика (в частности, на кривой становления на частотах стоячих волн), так как именно амплитуда рассматриваемого поля оказывается существенной в условиях резонанса.

Таким образом, основанная на этом принципе зондирующая система по форме реализации является электромагнитной, а по своей сущности — акустической. И эта передача энергии оказывается наиболее значимой в случае слоя, мощность которого меньше длины затухания звука в среде распространения. Высокая разрешающая способность такой возможной зондирующей системы основана на низкой скорости распространения акустических волн в геосреде, обладающих малыми длинами волн по сравнению с электромагнитными волнами той же частоты.

Как известно, разрешающая способность электромагнитных методов в квазистационарной области существенно ограничена гладким пространственным поведением диффузионных электромагнитных полей. Грубое эмпирическое правило для определения возможности выделения локального аномального объекта в геосреде: разрешимая аномалия должна иметь размеры, сравнимые с расстоянием от нее до точки, в которой измеряется поле [Некут, Спис, 1989, с. 66]. В противоположность этому при распространении волновых полей разрешимая аномалия должна иметь размеры того же порядка, что и длина волны в среде.

Заметим, что классический подход к объяснению особенностей процесса становления концентрируется исключительно в области электродинамики материальных сред. Актуальной в этой связи становится задача выделения тех из них, которые образуются за счет генерации электромагнитных возмущений звуком, которые в условиях резонансах могут стать доминирующими, т.е. обладать заметной амплитудой.

ЭМАП и полевой эксперимент. Очевидно, можно утверждать, что к настоящему времени имеется необходимая теоретическая база для экспериментальных исследований по идентификации особенностей переходного процесса на фоне обычного диффузионного спада. В общих чертах ясен и механизм формирования акустического поля в скин-слое источника поля в геосреде как электромагнитно-динамического эффекта, а обратный процесс, т. е. генерация электромагнитных возмущений

звуком обусловливает возможность регистрации акустических колебаний. При этом как прямое, так и обратное ЭМАП имеет резонансный характер, причем на частотах резонанса возбуждаются звуковые стоячие волны, электромагнитное поле которых может регистрироваться тем же преобразователем — индуктивной катушкой. Важно, что с точки зрения интенсивности возбуждаемого таким образом звука наиболее выгодна и эффективна генерация стоячих звуковых волн в горизонтально-слоистой структуре. Созданной в слое звуковой волне сопутствует электромагнитное поле, характеризующееся звуковым законом дисперсии. Существенно, что амплитуда этого слабозатухающего в геосреде поля в условиях резонанса может оказаться заметной, доступной для регистрации существующими приборами. Задача теперь состоит в том, чтобы восстановить структуру этой части или компоненты электромагнитного отклика, которая формируется за счет генерации электромагнитных возмущений звуком в зависимости от формы, частоты, скважности, полярности и амплитуды импульса тока в источнике возбуждения электромагнитного поля.

Парадоксально, но такой эксперимент по восстановлению этой структуры отклика уже имеется. В качестве частного примера очевидно можно сослаться на работы [Левашов и др., 2002, 2003; Финчук, Скопиченко, 2003; Финчук и др., 2003], в которых при визуализации разреза (среды распространения) используются скорости распространения процесса именно звукового диапазона. При этом регистрация пространственных и временных особенностей отклика, определение его тонкой структуры, осуществляется либо путем подбора резонансной частоты генератора, либо с помощью длинных линий, расположенных на земной поверхности. В ряде случаев такой простейший способ диагностики разреза оказался достаточно эффективным, о чем свидетельствуют имеющиеся примеры [Шуман и др., 2008]. Тем не менее его систематическое применение без должного понимания физической стороны проблемы, которая обычно оставалась «за кадром» и не дискуссировалась в должной мере, оказалось уязвимым для критики со стороны многих профессиона-

лов. И это понятно. Только четкая физическая картина процесса, его подробное математическое описание дают ключ к пониманию возможностей метода, его особенностей и ограничений.

Заключение. Оценивая в целом тенденции и пути развития исследований по теории и практике электромагнитных зондирующих систем, можно отметить, что к настоящему времени достигнуто достаточно полное понимание переходных процессов в геосреде в поле различных источников, механизмов формирования и доставки электромагнитного отклика к пунктам его регистрации, осцилляций на переходных характеристиках, опираясь на электродинамику сплошных сред. Но, как говорят физики, всегда ли мы верно понимаем то, что как будто бы знаем? Ведь всегда имеется вероятность того, что мы не учли какого-либо существенного обстоятельства, меняющего существо дела. И нередко именно здесь проявляется вся мощь, роль и значение эксперимента, который, вообще говоря, не является полностью формализованной операцией, так как касается реальности, а не формализованной системы. Явление прямого и обратного электромагнитно-акустического преобразования — удачный пример такого свойства. ЭМАП открывает принципиально новые возможности создания зондирующих систем высокого разрешения. Отметим, что к настоящему времени эта проблема приобрела особую актуальность: многие их модификации значительно исчерпали свой ресурс и нуждаются в модернизации.

Актуален и другой аспект этой проблемы — создание методов нелинейной акустоэлектромагнитной диагностики геосреды, физической основой которых могут служить большие объемные нелинейности структурно-неоднородных многофазных сред.

Как известно, линейное методы позволяют исследовать объекты, изменяя частоту, фазу, поляризацию и направление распространения волны. Идеи, лежащие в основе нелинейных методов диагностики, основываются на зависимости отклика от амплитуды (интенсивности) возбуждающего импульса и его полярности. При этом наличие механизмов, переносящих энер-

гию колебаний в низкочастотную или высокочастотную области спектра, означает, что регистрируемый отклик, прошедший через реальную структурно-неоднородную среду, несет информацию о трассе своего распространения. Тем самым появляются «новое измерение» и новые возможности диагностики геосреды, создания зондирующих систем высокого разрешения. Разумеется, решение этих вопросов требует новых подходов как к измерительной технике, так и к теоретическому истолкованию результатов измерений.

Настоящая смена теории не есть смена уравнений — это смена математических структур.

акад. РАН Ю. И. Манин

Современные электромагнитные зондирующие системы: состояние, тенденции развития, новые идеи и задачи

Геофизический журнал, № 4, Т. 34, 2012, С. 282—291.

Введение. Электромагнитные зондирующие системы — важный компонент современной палитры геофизических методов исследования земной коры. За последние десятилетия теория и практика электромагнитных зондирующих систем с контролируемым и естественным возбуждением поля достигла определенности совершенства. Многие ее разделы развиты с достаточной полнотой, создан математический аппарат для решения прямых и обратных задач, существенно расширен класс физических моделей и уравнений, используемых для описания взаимодействия электромагнитных возмущений с геосредой и их распространения вдоль границы раздела «земля—воздух». В настоящее время существуют прекрасные достаточно подробные обзоры, посвященные этой тематике (см., например, [Труды..., 1989, С. 3—85; Edwards, 2005; Пальшин, 2009; Constable, 2010; Zhdanov, 2010 и др.]). В них с достаточной полнотой изложена эволюция концептуальных и технических основ электромагнитных методов, их история становления и направлений дальнейшего развития.

Чтобы избежать повторов и оживить обсуждение, очевидно можно попытаться рассмотреть эти вопросы в более широком контексте или добавить к обсуждению немного личных соображений. В обоих случаях, однако, возникает опасность переключиться и сосредоточиться на темы, лишь отчасти связанные с задекларированными в названии. Переходя к изложению, прошу извинения за выбор столь сомнительной тактики. В настоящей статье попытаемся сосредоточиться на вопросах и проблемах, решение которых требует более детального, чем принято сегодня, понимания свойств геофизической среды, ее электромагнитного возбуждения и взаимодействия с электромагнитным полем, существование ответов, которые не столь очевидны, а время ожидания этих ответов неопределенно. Не удивительно, если маститые теоретики («акулы» геоэлектрики) сочтут эти попытки поверхностными, а закоренелые практики — неинтересными. Очевидно, здесь трудно обойтись без разочарований и раздражения при обсуждении вопросов, которые мы знаем или думаем, что знаем. В частности, в отношении некоторых из них нет полной ясности даже в самой их постановке, в понимании геологических моделей объектов и их физических особенностей. В столь трудно формализуемой ситуации неизбежное распространение получили интуитивные, эвристические идеи и подходы, основанные в ряде случаев на весьма упрощенных и поэтому спорных физических представлениях. Стало ясно, что некоторые утверждения, широко проникающие в геофизическую литературу, на самом деле неточны или заведомо некорректны. Приведем некоторые примеры, дающие представление о сути этих проблем.

Что мы наблюдаем сегодня в магнитотеллурике? Как известно, в основу классической магнитотеллурической (МТ) теории положено явление скин-эффекта как отклик среды на внешнее переменное тангенциальное к границе раздела электромагнитное поле. Начиная с фундаментальных работ А. Н. Тихонова (1950) и Л. Каньяра (1953), в практику магнитотеллурики прочно вошла концепция поверхностного или входного импеданса, а изучение импедансных соотношений на границе

раздела «земля—воздух» стало одной из ключевых ее проблем. Существенно, что амплитудные оценки импеданса (тензора импеданса) непосредственно преобразуются в параметры кажущегося сопротивления и обеспечивают физически содержательную визуализацию среды.

Одна из главных проблем МТ-метода — существенные искажения амплитудных оценок импеданса приповерхностными неоднородностями (гальванический эффект) [Бердичевский и др., 1997]. Для их преодоления современная магнитотеллурика делает акцент на интерпретацию фазовых компонент импеданса. Новые элементы этой стратегии — математическая физическая декомпозиции тензора импеданса, введение фазового тензора импеданса, позволяющего исключить гальванические искажения [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. Но, безусловно, эта модель — лишь приближение к действительности. В общем случае связь между компонентами электромагнитного поля на дневной поверхности нелокальна и определяется трехмерным распределением электропроводности в исследуемом разрезе.

Как известно, проблема импедансного описания электромагнитного поля на границе раздела «диэлектрик—проводник» имеет сравнительно давнюю историю и довольно обширную библиографию, в которой представлены различные ее аспекты, включая вопросы физической трактовки и методы экспериментальных оценок (см., например, [Senior, Volakis, 1995; Бердичевский, Дмитриев, 2009; Шуман, 2011а] и цитируемую там литературу). О конструктивном характере этой эвристической идеи и возможностях ее экспериментальных приложений может свидетельствовать активная дискуссия, которая ведется до настоящего времени в таких ведущих изданиях, как «Успехи физических наук» [Альшиц, Любимов, 2009; Гульельми, 2010], «Письма в ЖЭТФ [Гульельми, 2009а,б]. Эта дискуссия продолжается и в геоэлектрике, отличаясь некоторой специфичностью постановки задачи [Дмитриев, Бердичевский, 2002; Шуман, 2010а; Шуман, Савин, 2011]. Однако эти дискуссии идут как бы в различных плоскостях. Они слабо связаны между собой, а имеющиеся в физических изданиях упоминания или указания на возмож-

ность использования полученных результатов в геофизике довольно фрагментарны и не вполне корректны [Шуман, Савин, 2011].

Очевидно, недостаточно четкие представления о сути рассматриваемого вопроса породило в среде геоэлектриков излишне оптимистические взгляды на возможность импедансных измерений и «типперизации» магнитотеллурики, критериях мономодальности МТ-отклика на земной поверхности и средствах его описания, адаптированных к 3D инверсии наблюденных данных. С целью расширения возможностей классической магнитотеллурики, в которой обычно используется тензор импеданса Z_τ, определяемый из соотношения между тангенциальными составляющими комплексных электрического **E** и магнитного **H** полей:

$$\mathbf{n}\times\mathbf{E} = Z_\tau\left[\mathbf{H} - \mathbf{n}\left(\mathbf{n}\cdot\mathbf{H}\right)\right], \qquad (1)$$

в работе [Дмитриев, Бердичевский, 2002] предпринята попытка введения обобщенной модели тензора импеданса для случая, когда первичное поле содержит заметную вертикальную магнитную составляющую H_z и, следовательно, не может быть приближено плоской волной:

$$\mathbf{n}\times\mathbf{E} = [Z']\mathbf{H}, \qquad (2)$$

где $\left[Z'\right] = \begin{pmatrix} Z'_x & Z'_{xy} & Z'_{xz} \\ Z'_{yx} & Z'_{yy} & Z'_{yz} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$.

Согласно уравнению (2), обобщенный тензор входного импеданса Z' состоит из шести компонент, связывающих амплитуды горизонтальной составляющей электрического поля $\mathbf{E}_\tau$ ($\mathbf{E}_z$ полагается равным нулю) с полным магнитным полем **H**.

Но и эта модель и с формальной, и с физической точек зрения отнюдь не универсальна: компонента H_z при переходе через границу раздела в общем случае может претерпевать разрыв, а признание в среде горизонтально распространяющейся волны хотя бы только магнитного типа, содержащей H_z, существенно

затрудняет возможности корректного определения компонент обобщенного тензора импеданса.

В рассматриваемом контексте заметим, что наши представления о магнитосферно-ионосферно-атмосферных процессах в последние годы претерпели существенные изменения. Соответственно изменились и наши представления о физических механизмах формирования электромагнитного отклика, регистрируемого на земной поверхности. Во-первых, в магнитосферных исследованиях в отличие от традиционного подхода, где базовым процессом является «пересоединение» магнитных силовых линий, в качестве такого рассматривается трансформация кинетической энергии солнечного ветра в электромагнитную во фронте головной ударной волны [Пономарева, Седых, 2006]. Во-вторых, новый подход к данной проблеме стимулировала концепция обобщенной глобальной электрической цепи, включающей в себя генератор ЭДС на внешней границе магнитосферы (магнитопаузе), управляемый солнечным ветром, атмосферные генераторы электрического поля в нижней атмосфере (грозы), электрически связанные с ионосферой и магнитосферой вдоль геомагнитных силовых линий. Глобальная токовая цепь позволяет рассматривать магнитосферу, ионосферу, атмосферу и литосферу в качестве единой электродинамической системы.

Существенно, что в таком случае основная часть тороидального магнитного поля в земной атмосфере не генерируется радиальным (вертикальным) током в окрестности пункта наблюдений, как это предполагалось ранее, а обусловлена продольными (полоидальными) токами вне ее, причем под ионосферой, в основном, фиксируются магнитные возмущения, генерируемые токами Холла. Однако сложность проблемы состоит в том, что ионосфера и литосфера — омические среды, где электрическое поле и ток связаны законом Ома, в то время как в магнитосфере прямой связи нет. Кроме того, земная атмосфера — не идеальный изолятор, а сама Земля обладает собственным геомагнитным полем, что также существенно влияет на формирование электромагнитного отклика на ее поверхности.

В итоге из-за эквипотенциальности магнитных силовых линий геомагнитного поля ток в ионосфере определяется магнитосферным электрическим полем, а ток в магнитосфере — распределением газового давления [Пономарева, Седых, 2006].

Наличие слабопроводящей атмосферы заставляет продольные токи вдоль силовых линий геомагнитного поля замыкаться на ионосферу, ток в которой — комбинированный. В нем всегда имеется и педерсеновская, и холловская составляющие. Однако, хотя сама структура продольных токов больших масштабов по данным спутниковых измерений изучена относительно подробно, падение потенциала и величину тока в глобальной электрической цепи из-за ограниченности экспериментальных данных в настоящее время оценить достаточно сложно. Следовательно, можно констатировать, что, вообще говоря, достоверно неизвестны характеристики как источников, так и генерируемых ими полей. В этом контексте задачи глубинного электромагнитного зондирования в общем случае следует отнести к смешанным, когда по некоторым известным (или предполагаемым) характеристикам исследуемого разреза и данным об электромагнитном поле определяются неизвестные параметры разреза и, если необходимо, самого поля. Ясно, что с целью упрощения задачи обычно используются различные приближения или «эмпирические» закономерности поведения электромагнитного отклика. В частности, для более полного воспроизведения экспериментальных результатов работе [Кувшинов, 2004] предложена модель «реалистического источника», которая строится в виде разложения по индивидуальному набору сферических гармоник на основе анализа только тангенциальных компонент вариаций геомагнитного поля при некотором заданном радиально-симметричном разрезе. Тем не менее из изложенного кажется очевидным, что желаемый уровень теории все еще не достигнут и нуждается в развитии. Предельно ясно, что отмеченные обстоятельства являются также причиной многих затруднений, свойственных классическому импедансному подходу [Шуман, 2008а; 2010а; Semenov, Shuman, 2010; Шуман, Савин, 2011].

Почему же эта теория (МТ-тензора импеданса) привлекает так много внимания профессионалов (многие из них настолько уверены в ее реальности, что это препятствует осознанию пределов ее применимости и, более того, полагают, что чего-то другого и не требуется) и молодых людей? Возможно, ее привлекательность связана с тем обстоятельством, что она математически изящна и, что существенно, обещает работу. Но, быть может, она все же нуждается в изменении? Разумеется, я не хотел бы, чтобы меня поняли так, что надо как-то отговаривать молодых людей (в отношении профессионалов это исключено) специализироваться в этой области, но, кажется, им все же нужно предоставить и альтернативы.

Одна из возможных альтернатив («дорога в будущее» по образной терминологии М. С. Жданова) представлена в работе [Zhdanov, 2010]: «Будущее развитие ЭМ методов будет основано на новых открытиях в области измерений, обработки и интерпретации данных. Будущий успех ЭМ разведки будет сопряжен с развитием площадных систем наблюдений, аналогичных сейсмическим системам сбора данных. В развитие интерпретации:

– быстрое и точное трехмерное моделирование;
– быстрая обработка изображений;
– крупномасштабная трехмерная инверсия.

Теория регуляризации будет играть ключевую роль в решении этих проблем».

Несомненно, все эти соображения, относящиеся к будущему, весьма важны и актуальны, но существует ли такая альтернатива применительно к магнитотеллурике уже сегодня? Очевидно, на этот вопрос можно дать положительный ответ. В частности, в работах [Шуман, 2010а; Шуман, Савин, 2011] предложена система векторных импедансных тождеств локального и нелокального типов для гармонического электромагнитного поля на замкнутых гладких границах раздела сред, генерируемое на их основе обобщенное дифференциальное уравнение импедансов и система скалярных уравнений, определяющих эту границу. Эти уравнения являются точными и зависят от

всех шести компонент электромагнитного поля, регистрируемых на рассматриваемой границе, и подлежат корректному экспериментальному определению. При этом, если по тем или иным причинам на практике используются их неполные, усеченные формы, они содержат, в отличие от классического описания, внутренние критерии применимости и не требуют для своего обоснования дополнительных эвристических или эмпирических соображений. Однако модели тензора импеданса, тензора Визе—Паркинсона, импедансного приближения Леонтовича, несмотря на их частный, приближенный характер, пользуются удивительной привязанностью и доверием подавляющего большинства геоэлектриков.

Отметим и некоторые тревожные моменты в развитии магнитотеллурики. В частности, обращает на себя внимание нарастание количества проектов, посвященных компьютерному моделированию на основе экспериментальных данных, часто неполных, фрагментарных, собранных другими исследователями. Не всегда ясны и очерчены задачи такого моделирования, что делает его зачастую оторванным от решения реальных задач современной геологии. Другой тревожный момент — недостаточное внимание к междисциплинарным проектам, что ведет к замыканию в кругу собственных проблем геоэлектрики, и было бы ошибочным сводить их к чисто техническим или технологическим аспектам.

Приведем еще одну выдержку из цитируемой статьи М. С. Жданова [Zhdanov, 2010]: «Важным направлением дальнейших исследований является многомерное моделирование и решение обратных задач, а также новый подход к формулированию и интерпретации основных уравнений электромагнитных полей, основанный на представлении электромагнитного поля с помощью потока и напряжения…».

Далее речь пойдет о том, что уравнения Максвелла могут быть получены непосредственно из математической теории дифференциальных форм [Zhdanov, 2010, Appendix A]. При этом физический смысл полей, появляющихся в уравнениях Максвелла, не анализируется и не рассматривается. Разумеет-

ся, практическое использование той или иной теории во многом является делом вкуса. Однако, боюсь, такой подход, не проясняя существо или физику дела, может дать повод к новым алгебраическим упражнениям, как это уже неоднократно случалось. В рассматриваемом контексте обратим внимание на два существенных аспекта. Первый из них относится к определению электрического поля **E** и магнитной индукции **H**, физический смысл которых, согласно Розенфельду, следует непосредственно из выражения силы Лоренца для движущейся со скоростью **v** пробной частицы с зарядом q:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\left[\mathbf{v}\times\mathbf{B}\right]. \qquad (3)$$

Безусловно, это определение верно для вакуума, но не соответствует случаю конденсированных сред: любая заряженная частица, движущаяся в среде, испытывает влияние этой среды. Частица поляризует среду и теряет энергию, что приводит к дополнительной силе, причем эта сила зависит от вида материальных уравнений. Чтобы в данном случае воспользоваться постулатом Розенфельда, необходимо знать явный вид этой силы [Виноградов, 2002].

Существует другой путь определения полей, связанный с установлением граничных условий и являющийся их следствием — метод полости [Виноградов, 2002]: поле внутри полости равно **E**(**H**), если полость вытянута вдоль силовых линий. Если же полость сплюснута, то поле в ней равно **D**(**B**). Законность максвелловских граничных условий может быть доказана экспериментально или с помощью микроскопической теории, описывающей структуру переходного слоя. Важно, что определение полей с использованием полости и граничных условий делает эти поля измеримыми и придает физический смысл решению рассматриваемой электромагнитной проблемы.

Возможно, при решении этого вопроса можно было бы воспользоваться определением полей, данным Ю. И. Маниным: электромагнитное поле — связность в пространстве внутренних степеней свободы квантового электрона, управляющая его эволюцией в пространстве-времени [Манин, 2008]. Однако та-

кой продвинутый подход к определению полей пока остается слишком дистанцированным от практических задач электродинамики сплошных сред и ее геофизических приложений.

Второй аспект касается форм записи уравнений Максвелла. Как известно, макроскопические уравнения Максвелла в среде могут быть представлены в разных формах. В частности, это — форма, предложенная Ландау и Лившицем, и форма, предложенная Борном и Федоровым (форма Казимира) [Виноградов, 2002]. Физически это обусловлено, в первую очередь, способом определения индуцированных в среде токов. Так, если ввести полную индукцию $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)=\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)+4\pi\mathbf{P}(\mathbf{r}, t)$, которая учитывает все эффекты движения зарядов и токи намагничения, а поляризация $\mathbf{P}(\mathbf{r}, t)$ включает в себя весь индуцированный ток без разделения на отдельные вклады, то система уравнений Максвелла примет вид

$$\begin{aligned}
\mathrm{rot}\mathbf{E}(\mathbf{r},t) &= -\frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r},t)}{\partial t}, \\
\mathrm{div}\mathbf{B}(\mathbf{r},t) &= 0, \\
\mathrm{rot}\mathbf{B}(\mathbf{r},t) &= \frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r},t)}{\partial t} + \frac{4\pi}{c}\mathbf{J}_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r},t), \\
\mathrm{div}\mathbf{D}(\mathbf{r},t) &= 4\pi\rho_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r},t), \qquad (4)
\end{aligned}$$

где $\mathbf{J}_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r},t)$ и $\rho_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r},t)$ — сторонние токи и заряды.

Если же представляется удобным или целесообразным разделить наведенные токи на ток свободных носителей, ток поляризации связанных зарядов и вихревой ток намагничения, то обычно вводят другие по смыслу векторы электрической индукции $\mathbf{D}(\mathbf{r},t)=\mathbf{E}(\mathbf{r},t)+4\pi\mathbf{P}(\mathbf{r},t)$ и напряженности магнитного поля $\mathbf{H}(\mathbf{r},t)=\mathbf{B}(\mathbf{r},t)-4\pi\mathbf{M}(\mathbf{r},t)$. При этом в поляризации среды $\mathbf{P}(\mathbf{r},t)$ можно учесть вклад токов свободных и связанных носителей заряда. Тогда вектор намагниченности среды $\mathbf{M}(\mathbf{r},t)$ будет определять вихревые токи. В итоге система уравнений Максвелла в среде будет выглядеть следующим образом:

$$\mathrm{rot}\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = -\frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r},t)}{\partial t},$$

$$\mathrm{div}\mathbf{B}(\mathbf{r},t)=0\,,$$

$$\mathrm{rot}\mathbf{H}(\mathbf{r},t)=\frac{1}{c}\frac{\partial\mathbf{D}(\mathbf{r},t)}{\partial t}+\frac{4\pi}{c}\mathbf{J}_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r},t)\,,$$

$$\mathrm{div}\mathbf{D}(\mathbf{r},t)=4\pi\rho_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r},t)\,. \qquad (5)$$

Разумеется, обе формы должны давать эквивалентное описание электромагнитных явлений. При этом граничные условия и материальные уравнения должны быть сформулированы в соответствии с конкретными особенностями задачи и моделью среды [Бредов и др., 1985].

В отличие от системы (4), система (5) содержит четыре вектора — **E**, **D**, **H** и **B**. Система (4) вектор **H** не содержит. При этом и система (4), и система (5) содержат избыточное число неизвестных и должны быть дополнены связывающими их материальными уравнениями, в которых и сосредоточена информация об индивидуальных свойствах среды. В общем случае эти характеристики представляют собой интегральные операторы по пространству и времени (в фурье-компонентах — функции круговой частоты ω и волнового вектора **k**; в этом случае это комплексные феноменологические параметры). Для стандартной модели сплошной среды они однозначно определяются для физически бесконечно малых объемов и не зависят от рассматриваемого объема. При этом последовательное определение диэлектрической и магнитной проницаемостей, как уже упоминалось, подразумевает разбиение индуцированного в среде тока на части, одна из которых ответственна за электрическую поляризацию, а другая — за намагничение.

Такая модель среды и поля а) включает достаточно информации, чтобы решить любую электромагнитную задачу и б) составляет фундамент современной геоэлектрики. Но, как известно, решение уравнений электродинамики в материальных средах исключительно разнообразны, что обусловлено разнообразием самих свойств сред. При этом развитие и совершенствование методов геоэлектрических исследований приводит к необходимости учета новых свойств или находящихся в специ-

фических условиях сред, и в этом контексте, очевидно, можно и нужно видеть перспективы их дальнейшего развития. В данном ключе и продолжим дальнейшее рассмотрение вопроса.

Геосреда и зондирующие системы. Как уже отмечалось, система макроскопических уравнения Максвелла с заданными линейными материальными условиями составляет фундамент современной электродинамики сплошных сред и, за некоторыми исключениями, является доминирующей в современной теории квазистационарной геоэлектрики [Светов, 1984, 2008]. Вошло в норму и стало традицией рассматривать земную кору при изучении ее взаимодействия с электромагнитным полем в качестве пассивного объекта, и это оправданно во многих случаях, но далеко не всегда.

Согласно полевому эксперименту, на земной поверхности наблюдается большое разнообразие электромагнитных возмущений различной природы, регистрируемых в исключительно широком диапазоне частот — от 10^{-4} до 10^{6} Гц и выше. Одни из них возбуждаются источниками в атмосфере (грозовые разряды, предгрозовое излучение), другие — в магнитосфере и ионосфере в результате взаимодействия солнечного ветра с геомагнитным полем или проникают в магнитосферу из межпланетной среды, третьи генерируются внутриземными источниками.

Как свидетельствует опыт развития геофизической науки, мы постоянно сталкиваемся с новыми или старыми, но находящимися в необычных условиях средами. Стало очевидным, что весьма проблематично предложить единую электродинамическую модель геосреды, удовлетворительно описывающую электромагнитные явления и процессы в столь обширном диапазоне частот в 10—12 порядков. При решении прикладных задач возникла необходимость обобщения стандартной линейной модели [Шуман, Савин, 2011]. В частности, предприняты попытки рассматривать геоэлектрическую модель геосреды в качестве некоего фонового скелета, обладающего проводящими диэлектрическими и магнитными свойствами, и плазмоподобного компонента («наполнителя»), состоящего из многочастичной электронно-ионной фракции, находящейся в подмагничивающем

поле земного ядра. В ней могут одновременно присутствовать и свободно движущиеся заряды, совершающие колебательные и вращательные движения [Гололобов и др., 1995; Шуман, Савин, 2011]. Но и такое обобщение оказалось явно ограниченным. К настоящему времени стало предельно ясно, что геосреда — очень специфический объект исследований. Она не может рассматриваться в качестве пассивного континуума — ей присуща внутренняя самоподобная структура. Она непрерывно подвергается воздействию внутренних и внешних сил, на нее постоянно действуют флуктуационные и периодические возмущения. Она является электродинамически активной средой, способной генерировать электромагнитное поле.

Очевидно, в рамках таких представлений геосреда, стремящаяся к самоорганизации, нуждается в новых моделях описания и анализа, которые бы позволили анализировать диссипацию поступающей в нее из низов литосферы энергии, релаксацию локальных напряжений, стационарные режимы деформирования, вопросы генерации и распространения акустосейсмических и электромагнитных возмущений.

Как известно, диссипативные твердотельные структуры, самоорганизующиеся в открытых системах, являются фрактальными: если вещество не находится в газообразном состоянии, то оно, как правило, имеет в некотором диапазоне масштабов фрактальную структуру [Зосимов, Лямшев, 1995]. Чем обусловлен интерес к подобным структурам в геоэлектрике? Прежде всего тем, что фрактальные среды, сформированные в условиях диссипации поступающей из низов литосферы энергии и являющиеся самоорганизованными структурами, приобретают необычные свойства, которые невозможно получить при традиционных способах формирования структурного состояния вещества земной коры. Заметим, что такое видение проблемы способствовало появлению нового направления электромагнитной теории сред, объединяющей фрактальную геометрию и электромагнетизм.

Очевидно, производимая стандартная процедура усреднения по пространству в такой среде позволяет в некоторых слу-

чаях эффективно использовать аппарат классической электродинамики сплошных сред, но исключает из рассмотрения ее детали, которые зачастую могут оказаться более значимыми для решения ряда прикладных задач [Шуман, 2012б]. Однако электродинамическое описание таких сред связано со значительными трудностями, обусловленными зависимостью их макроскопических электромагнитных параметров от рассматриваемого объема, что делает невозможным применение стандартной модели сплошной среды, в которой они определяются однозначно для физически бесконечно малых объемов [Потапов, 2000; Болотов, 2002; Тарасов, 2009; Боголюбов и др., 2009; Шуман, 2012б].

Электродинамика фрактальных сред также оперирует физическими величинами, усредненными, однако, по «физически малым» фрактальным элементам объема. В итоге ключевым элементом здесь является процедура усреднения, построение которой оказывается возможной с использованием фрактальных и мультифрактальных мер [Болотов, 2002; Боголюбов и др., 2009]. Следовательно, достаточно полное описание процессов взаимодействия электромагнитного поля со средой, обработки сигналов, генерируемых в ней, становится невозможным или проблематичным с помощью стандартных алгоритмов и формул, полученных на основе представлений электромагнитного отклика в пространстве целочисленной меры и гладких функций. Очевидно, эти идеи и подходы позволяют с иных позиций подойти к анализу возможностей зондирующих систем и решаемым ими задачам, которые вполне логично отнести к неклассическим. Это открывает новые и неожиданные перспективы и возможности создания зондирующих систем, ориентированных на изучение свойств геосреды, ее текущего состояния и, возможно, прогноза поведения [Шуман, 2010б, 2011а, 2012г].

Заметим также, что идеи о самоорганизации и образовании диссипативных структур в открытых системах оказались очень плодотворными с точки зрения того, чтобы перебросить мост между физикой, геофизикой и геологией. В частности, наблю-

даемый повсеместно сейсмоэлектромагнитный шум литосферы может интерпретироваться в качестве проявления детерминированного хаоса в иерархически структурированной фрактальной среде. Существенно, что образование фрактальных агрегатов резко увеличивает мощность создаваемого в среде излучения, которое обладает упорядоченной пространственной структурой, тесно связанной со строением и динамикой геосреды, в частности с топологией ее межблочной структуры. При этом фракталы заставляют пересмотреть традиционные взгляды на геометрические свойства объектов в геосреде, а динамический хаос, свойственный большей части динамических систем, вносит существенные изменения в понимание того, как эти объекты могут вести себя во времени. Это позволяет ставить задачи реконструкции динамических систем, их идентификации, возможностей прогноза и управления, совершенно нетипичные для классических методов геофизики. В частности, нелинейные сейсмические, электромагнитные и другие геофизические процессы в геосреде имеют широкий спектр проявлений и могут быть использованы для диагностики ее структуры и состояния. В качестве примера новых методов геофизической разведки отметим такие, как метод эмиссионной томографии, ориентированный на реконструкцию пространственного распределения плотности мощности эмиссионного сейсмоакустического излучения литосферы, и метод анализа спонтанной электромагнитной эмиссии Земли, также генерированной литосферой в широком диапазоне частот [Спивак, Кишкина, 2004; Шуман, 2010б,в, 2012в]. И, наконец, такой обновленный взгляд на геосреду, механизмы генерации формирования и распространения в ней акустосейсмоэлектромагнитных взаимодействий и преобразований в морской среде в присутствии постоянного магнитного поля земного ядра позволяет понять тот экспериментально установленный замечательный факт, что пространственная структура плотности импульсного потока электромагнитного излучения, регистрируемого на поверхности водной среды или над нею, в воздухе, содержит информацию о строении и динамике среды под морским дном. Последнее обстоя-

тельство с точки зрения классических воззрений о механизмах генерации электромагнитного излучения, их распространении к дневной поверхности и представлений электродинамики сплошных сред казалось совершенно невозможным, лишенным физических оснований [Шуман и др., 2011].

Заключение. Оценивая в целом современное состояние, тенденции и направления развития теории и практики электромагнитных зондирующих систем, можно отметить следующие обстоятельства.

В области геоэлектрических методов с естественным возбуждением поля используемые связи непосредственно между компонентами электромагнитного поля, регистрируемыми на дневной поверхности (тензор импеданса, обобщенный тензор импеданса, тензор Визе—Паркинсона и др.), носят частичный характер и справедливы только при специальных формах задания поля. Понятно, что проблема импедансного описания электромагнитного отклика на поверхности Земли с учетом возможного присутствия тороидальной компоненты магнитного поля в слабопроводящей атмосфере, традиционно рассматриваемая на основе эмпирических или эвристических соображений, все еще остается актуальной. При этом обычно используемая трактовка механизмов возбуждения реальной Земли как «индукционного» или «гальванического» является весьма ограниченной [Шуман, Савин, 2011].

Можно предположить, что неверно выбранная парадигма во многом способствует и является причиной затруднений, свойственных классической теории глубинных зондирующих систем. С этой точки зрения ориентация только на технологические приемы, совершенствование измерений, обработки и интерпретации, несмотря на свою значимость и актуальность, сильно ограничивают поиск и подавляют появление новых идей. С точки зрения геоэлектрических приложений интерес представляют векторные импедансные тождества локального и нелокального типа для гармонического электромагнитного поля на замкнутых регулярных границах раздела сред и генерируемые на их основе дифференциальное уравнение импедансов и

система скалярных уравнений, определяющих эту границу. При этом входящие в них скалярные параметры (импедансы) подлежат, в отличие от тензорного описания, корректному экспериментальному определению.

В области геоэлектрики с контролируемым возбуждением актуальна проблема создания зондирующих систем высокого разрешения. В частности, методов нелинейной акустоэлектромагнитной диагностики геосреды, физической основой которых могут служить объемные нелинейности структурно-неоднородных многофазных сред. Явление прямого и обратного электромагнитно-акустического преобразования — один из примеров такого рода [Шуман, 2012г].

На основе представлений о геосреде как открытой нелинейной диссипативной динамической системы становится очевидной необходимость смены «детерминистской» парадигмы изучения геосреды и динамических процессов в ней на парадигму нестационарных флуктуаций геофизических полей как естественного физического явления, не требующего специального приготовления. Отличительным признаком нелинейных диссипативных систем — волновая (автоволновая) и резонансная природа процессов, большая роль малых возмущений. При рассмотрении таких систем, понимании свойств и механизмов генерации и распространения сейсмоэлектромагнитного шума как естественного физического явления определяющее значение имеет известная флуктуационно-диссипативная теорема, связывающая спонтанные флуктуационные системы с ее диссипативными свойствами.

Еще один важный аспект проблемы — учет фрактальной структуры среды. Фракталы, рассматриваемые как «мгновенные» срезы самоорганизованных критических процессов, способствуют пересмотру взглядов на геометрические свойства объектов в геосреде, а динамический хаос вносит существенные изменения в понимание того, как эти объекты могут вести себя во времени.

Можно предположить, что нелинейные сейсмоакустические и электромагнитные процессы, имеющие широкий спектр проявлений, могут быть эффективно использованы при решении актуальных задач геофизики. Иллюстрацией сказанного является метод эмиссионной томографии, реконструирующий пространственное распределение плотности мощности излучения земных недр, и в некотором смысле его электромагнитный аналог — метод анализа спонтанной электромагнитной эмиссии Земли (МАСЭМЭЗ). Отчетливо видны и трудности применения нелинейно-динамического подхода к изучению геосреды, обусловленные их необычностью, сложностью, отсутствием необходимой информации о ее свойствах на глубине, принципах межсистемных взаимодействий, возможностью различного физического содержания процессов на разных уровнях ее структурной организации.

И, наконец, совершенно новое направление исследований — это решение задач, связанных с управлением процессами в геосреде и поисками возможностей осуществления управляющего (в частности, электромагнитного) воздействия на относительно коротких временных интервалах. Идея управления может состоять в том, чтобы воздействовать на среду, комбинируя (согласовывая) контролируемое и естественно-шумовое воздействие [Шуман, 2010б, 2011а]. Это неизбежно заставляет придавать больший вес, значение и роль мониторинга за геофизическими процессами, углубленной обработке получаемой информации в реальном масштабе времени.

Таким образом, перспективы развития и сфер применения электромагнитных зондирующих систем представляются весьма привлекательными и даже захватывающими. Существенно, что этот вывод следует как из экспериментальных наблюдений, так и теоретических представлений и оценок.

О проблеме фоновой электромагнитно-акустической регуляции сейсмичности: геоинженерный аспект

Геофизический журнал,
№ 1, Т. 35, 2013, С. 46—60.

Введение. Сейсмичность (поток сейсмических событий различного ранга и интенсивности) является проявлением геологической эволюции Земли. Вопросы о возможности влияния или воздействия на параметры сейсмичности природными, контролируемыми или техногенными источниками, его физическая и геологическая природа, понимание процессов в геосреде и реализация понимания — одна из актуальных проблем современной геофизики. Очевидно, по своей значимости эта проблема стоит в одном ряду с прогнозом сейсмичности, а может быть даже является и более важной, хотя решение обеих этих проблем тесно связаны между собой. Как известно, принципиальная возможность влияния на сейсмичность, процессы формирования и распада крупномассштабных структур разрушения в земной коре источниками различного происхождения можно считать установленной [Николаев, 1993, 1999, 2002; Тарасов и др., 1999, 2001; Авагимов и др., 2005; Гуфельд, 2007; Мирзоев и др., 2009 и др.]. В частности, на сейсмичность оказывают влияние подземные ядерные промышленные и карьерные взрывы, вибрации

создаваемые сейсмическими вибраторами, сбросами воды с высотных плотин, массовыми бомбардировками территорий бывшей Югославии, Афганистана, Ирака, погодные и космологические факторы [Гуфельд, 2007; Мирзоев и др., 2009]. Обнаружено влияние мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность, периодических нагнетаний жидкости в глубокие скважины.

Суть и история вопроса, итоги исследований по природным и техногенным воздействиям на сейсмичность очерчены и представлены в недавних работах А. Л. Гуфельда [Гуфельд, 2007; Гуфельд и др., 2011] и К. М. Мирзоева, А. В. Николаева, А. А. Лукка, С. Л. Юнга [Мирзоев и др., 2009]. Однако, несмотря на значительные усилия, многие аспекты проблемы влияния на сейсмичность до сих пор остаются неясными. На геосреду и процессы в ней действуют многочисленные внутренние и внешние регулярные и стохастические источники, акустические и электромагнитные импульсы различной интенсивности и цветности, способные проявляться только на определенном (соответствующем их масштабу) иерархическом уровне структурной и динамической организации диссипативных структур (паттернов) геосреды. При этом кластерная сущность организации ее конденсированной фазы требует системного анализа структур и функционирования сложных эволюционирующих во времени объектов, которые в зависимости от иерархического уровня своей организации проявляют свойства детерминированных, стохастических, хаотических и сложных систем [Лукк и др., 1996; Анищенко, 1997; Фрадков, 2005; Геншафт, 2009; Лоскутов, 2010]. Эти системы, обладая свойствами физичности и моделируемости, характеризуются уникальностью и слабопредсказуемостью. В итоге, как правило, мы имеем дело с эмпирикой без должного теоретического обоснования. В частности, отсутствуют достаточно полные и адекватные модели глобального сейсмического процесса, отражающего временные изменения сейсмичности всего земного шара (seismology is still in pre-equation state [Keilis-Borok, 1994]). Проблемными остаются внутриплитовые землетрясения, природа слабой сейсмичности и микросейсмического шума [Мирзоев и др., 2009].

В рассматриваемом контексте предлагаемое в работе [Мирзоев и др., 2009, с. 50] решение проблемы «… с помощью регулируемой закачки воды в скважины и вибровоздействий земной коры, согласованных с ритмом приливных движений» представляется малоэффективным и ориентированным на очень узкий спектр задач.

Во-первых, такая технология воздействия ориентирована на приповерхностный слой земной коры, который практически не напряжен и наиболее сильно подвержен воздействию фоновых полей различной природы и может рассматриваться в качестве эффективного рассеивателя энергии, поступающей как с низов земной коры, так и внешних источников. Да и сама среда в пределах этого слоя в подавляющем большинстве случаев реактивна по отношению к физическим полям, в частности электромагнитным.

Во-вторых, не учитывается ряд существенных деталей процессов, отличающих поведение горных пород в земной коре в естественном залегании и в лабораторном эксперименте. В частности, из рассмотрения выпали не моделируемые при нагружениях лабораторных образцов быстрые и разномасштабные вариации объемно-напряженного состояния (ОНС) геосреды, которые некоторыми исследователями рассматриваются в качестве ее реакции на взаимодействие с восходящими потоками легких газов [Гуфельд, 2007; Гуфельд, Матвеева, 2010; Gufeld et al., 2011].

В-третьих, хотя и отмечается, что в основу рассуждений положена физическая модель геосреды, предложенная М. А. Садовским, в работе [Мирзоев и др., 2009] не рассматриваются и не упоминаются общие законы воздействия и управления нелинейными активными распределенными системами, установленные физиками.

В рассматриваемом контексте кажется естественным скепсис и неверие в возможность эффективного контролируемого воздействия на сейсмический процесс, который присутствует среди многих геофизиков-профессионалов. Вероятно, он также обусловлен и базируется на убежденности в том, что энергия

воздействия должна быть значительной, сопоставимой с энергией объекта воздействия. Но, как оказалось, это не так и некоторый оптимизм здесь связан с высокой чувствительностью пространственно-связанной блочной структуры земной коры к внешним воздействиям.

В рамках этих представлений задача может быть сформулирована иначе: контролируемыми источниками воздействовать на динамику восходящего потока легких газов, восстанавливая тем самым режим фонового движения блоков [Гуфельд, 2007].

Как свидетельствует эксперимент [Авагимов и др., 2005; Гуфельд, 2007; Гуфельд и др., 2011], энергетика эффективного воздействия может быть несоизмеримо мала по сравнению с мощностью естественных процессов в геосреде. При этом, разумеется, речь идет об открытой физической системе — геосреде, через которую протекают большие энергетические потоки. В этом аспекте фоновые, достаточно слабые воздействия могут оказаться конструктивнее мощных (к примеру, подземных ядерных взрывов, которые ведут к разрушению системы) [Фрадков, 2005; Колесников, 2009].

Можно предположить, что существует некоторое минимальное значение интенсивности управляющего воздействия, ниже которого такое управление становится невозможным и оно не решает поставленную задачу. Очевидно также, что должен быть найден амплитудно-частотный оптимум сигнала и способ его введения в геосреду, морфология и параметры состояния которой часто оказываются неизвестными и изменяющимися во времени.

Как известно, быстрые процессы в геосреде могут происходить в результате фазовых переходов как явление декомпрессии при термодинамической неустойчивости локальных объемов земной коры с восходящими потоками легких газов и экзотермических реакций водорода с другими газами [Гуфельд, 2007]. Подобные явления характерны для самоорганизующихся открытых нелинейных диссипативных систем. Такие системы обычно демонстрируют поведение типа динамического хаоса и обладают свойством локальной неустойчивости. Это свойство

предопределяет наличие горизонта предсказуемости поведения системы, который обычно с большим трудом поддается расширению [Кравцов, 1989; Лукк и др., 1996; Шаповал, 2011]. Тем не менее в рамках концепции динамически неустойчивой геосреды, вообще говоря, идея регулирования (влияния) сейсмичности, несмотря на сложность и проблемность реализации, кажется вполне правомерной и даже простой. Но тогда почему на нее ушло так много времени? Возможно, основная причина кроется в недоверии — многие профессионалы не верили, что она может работать. Но даже в таком случае она может оказаться интересной. Разумеется, простых решений задачи воздействия на геосреду с целью контроля сейсмичности, не учитывающих прогноз активности сейсмических событий, релаксирующее действие естественных фоновых физических полей и особенностей пространственно-временного режима слабой сейсмичности, ожидать не приходится. Ее решению мешает и неопределенность геофизической модели геосреды, и наличие шумов различной природы, и острая недостаточность экспериментальных данных, и ограниченность финансовых ресурсов.

Цель настоящей статьи довольно ограниченная — проанализировать ряд аспектов проблемы регуляции и влияния, неопределенности и ограничения модельных представлений, а также рассмотреть некоторые технологические возможности ее реализации.

Геофизическая среда. Важнейший итог экспериментальных исследований, начатых в 70—80 гг. прошлого века под руководством академика М. А. Садовского, учение о геосреде, суть которого состоит в ее иерархической неоднородности, физической нелинейности, активности, изменчивости (пространственной и временной) физических свойств, способность происходящих в ней процессов взаимодействовать между собой [Садовский, 2004].

Геосреда — хороший пример открытой неравновесной системы с множеством самоорганизующихся структур [Лукк и др., 1996; Гуфельд, 2007; Шуман, 2011б]. Она предельно энергонасыщена, в ней существуют комплексы нелинейных взаимо-

действий между физическими полями, структурами и подсистемами [Гуфельд, 2007; Геншафт, 2009]. В частности, на ее предельную энергонасыщенность указывают современные движения, постоянное деформирование, характерные как для сейсмоактивных, так и для асейсмических регионов. Энергетическая подпитка вызывает увеличение неравновесности и неустойчивости системы. Она способна формировать различные пространственно-временные структуры, представляющие собой импульсы и фронты возбуждения, неустойчивость которых приводит к установлению в ней самоподдерживающихся колебаний с определенной конфигурацией. В неоднородной среде колебательная неустойчивость ведет к образованию стоячих волн. При этом достаточно располагать источником энергии, чтобы самовозбуждение колебаний стало возможным. Самый мощный источник энергии в литосфере — тепловой поток из ее низов.

Как показано в ряде работ (см., например, [Зосимов, Лямшев, 1995] и цитируемую там литературу), диссипативные твердотельные структуры, самоорганизующиеся в открытых системах, являются фрактальными. Как оказалось, фрактальные свойства и формы присущи большому количеству процессов и структур. Интерес и успех в применении фрактальных моделей вызван и обусловлен, прежде всего, тем обстоятельством, что сформированные в условиях диссипации энергии в открытой системе — геосреде и являющиеся самоорганизованными структурами приобретают ряд необычных свойств, которые невозможно получить при традиционных способах формирования структурного состояния вещества. Можно думать, что фрактальные структуры и геометрический шум литосферы (в частности, шум мерцания), являются, соответственно, пространственными и временными «отпечатками» или «срезами» самоорганизованной критичности.

Понятно, что необходимость описания рассматриваемых систем и попыток прогноза их эволюции привели к появлению серии выдающихся работ, в которых были заложены основы теории самоорганизации. При этом использовались различные подходы и названия: теория самоорганизации или теория дис-

сипативных структур, синергетика, теория открытых систем, информационная динамика [Изаков, 1997].

Существенно, что постоянно действующие внешние факторы — лунно-солнечные приливы, изменения скорости вращения Земли, сильные сейсмические события и другие факторы оказывают сильное влияние на геологическую эволюцию Земли. При этом иерархическая неоднородность среды определяет появление сильных концентраций волновых полей на малых дефектах ее структуры и объясняет сильную нелинейность физических свойств горных пород, проявляющуюся при распространении весьма слабых возмущений — сейсмических, электромагнитных, деформационных [Николаев, 2002].

Определяющее значение имеет тот факт, что встав на позиции признания геосреды в качестве открытой нелинейной диссипативной динамической системы, можно, понять ряд явлений, не находящих отражения в рамках классических подходов. С этих позиций и продолжим дальнейшее рассмотрение упомянутых во введении задач.

Сейсмичность в литосфере. Как известно, сейсмические явления включают крупномасштабные разрывы в земной коре (сильная и средняя сейсмичность), непрерывный планетарный микросейсмический шум и криповые подвижки блоков [Садовский, 2004; Гуфельд, 2007]. С. В. Гольдин выделяет четыре типа или класса механических движений, в которые вовлекаются горные породы земной коры: движения блоков как жестких тел, волновые движения, в частности, сейсмические волны, течение вещества (крип), переупаковка [Гольдин, 2004].

Землетрясения классифицируются по глубине гипоцентров как неглубокие (литосферные), $h<70$ км, промежуточные (астеносферные), $h\approx 70 \div 300$ км и глубинные, $h>300$ км. На глубине более 720 км землетрясения не отмечены. Подавляющее их число происходит на границах литосферных плит. Многочисленными исследованиями установлен ряд глобальных и локальных закономерностей сейсмического режима. В частности, отмечается наличие двух компонент сейсмической активности (T- и M-компоненты) [Фридман и др., 2010]. Каган образно опреде-

лил сейсмичность как «турбулентность в земной коре» [Kagan, 1994]. Как и в турбулентности, существует источник энергии, постоянно создающий на границах плит напряжения посредством конвекции в мантии, приводящий в движение плиты относительно друг друга. Проблемными остаются внутриплитовые землетрясения, природа слабой сейсмичности и микросейсмического шума [Гуфельд, 2007; Гуфельд и др., 2011]. Очевидно, их механизмы различны.

Как уже отмечалось, «мотором» всей геодинамики является геотермический поток со средней мощностью $w \approx 90$ мВт/м^2, что при интегрировании по всей площади земной поверхности дает полную мощность $4{,}5 \cdot 10^{13}$ Вт [Голицын, 2008]. Эта мощность расходуется как на образование и поддержание плит, так и на сейсмический процесс, на который, согласно имеющимся оценкам, уходит лишь порядка 0,1 % поступающей геотермической мощности. При этом плиты не могут быть меньшими по размеру, чем толщина литосферы. Сама же земная кора весьма неоднородна по латерали.

И. Л. Гуфельдом предложена физико-химическая модель сейсмичности, в основу которой положены представления о реакции блочной геосреды на взаимодействие с восходящими потоками легких газов (водород, гелий) и экзотермических реакций водорода с другими газами и рассмотрены сценарии развития сейсмотектонических ситуаций для платформенных областей [Гуфельд, 2007]. Предполагается, что основным переменным фактором, определяющим и поддерживающим текущую нестабильность геосреды и поддержание ее на уровне, близком к критическому (предельному), выступает восходящий поток легких газов из мантии. Следствием их взаимодействия с твердой фазой литосферы являются вариации ОНС геосреды.

Примечательно, что лабораторный эксперимент по моделированию процессов взаимодействия легких газов с образцами горных пород подтверждает это предположение. Следовательно, динамические явления и вариации различных параметров геосреды в принципиальном плане могут рассматриваться на основе этих процессов. Заметим, что в силу своей фундамен-

тальности и простоты парадигма самоорганизованной критичности также оказалось востребованной к описанию процессов формирования сейсмических событий [Шаповал, 2011].

Геосреда и вызванная сейсмичность. В связи с изложенными представлениями возникает ряд вопросов. Очевидно, первый из них — можно ли воздействовать на ход сейсмического процесса, влиять на его параметры источниками естественного или контролируемого (искусственного) происхождения в принципе, вообще и, в частности, таким образом, чтобы сильное сейсмическое событие заменить серией более слабых, крипом или нарушить связанное состояние блоков, сформировавшихся в процессе эволюции земной коры? Как свидетельствует эксперимент, имеются весомые свидетельства реакции геосреды на действие относительно слабых искусственных и естественных физических полей [Тарасов и др., 1999, 2001; Закржевская, Соболев, 2002; Авагимов и др., 2005; Гуфельд, 2007 и др.]. При этом речь не идет об уменьшении предельной энергонасыщенности геосреды, что, очевидно, невозможно [Gufeld et al., 2011].

В этой связи следует отметить обнаружение «спокойного» периода сейсмической активности, совпадающего с проведением подземных ядерных испытаний США и СССР (наиболее активная фаза с 1966 по 1988 гг.). В этот период, очевидно, можно говорить об изменении характера сейсмичности на всем земном шаре: наиболее сильные землетрясения с магнитудой $M \geq 8{,}3$ отсутствовали полностью [Фридман и др., 2010]. Однако такое энергозатратное, весьма специфическое и экологически небезопасное воздействие по известным причинам вряд ли можно считать эффективным или приемлемым «управлением», которое обычно ассоциируется с малыми внешними возмущениями или малыми изменениями в структурных элементах системы [Кадомцев, 1994]. С этой точки зрения важны экспериментальные доказательства реакции геосреды на действие весьма слабых полей источников естественного и искусственного происхождения, приведенные в серии статей [Тарасов и др., 1999; Закржевская, Соболев, 2002; Авагимов и др., 2005; Гуфельд, 2007 и др.]. Здесь на первый план выходит проблема бы-

строй изменчивости параметров среды, которая находит объяснение в рамках концепции динамически неустойчивой геосреды. Согласно И. Л. Гуфельду, основной переменный фактор, определяющий и поддерживающий текущую нестабильность геосреды вблизи предельного уровня, может быть восходящий поток легких газов [Гуфельд, 2007]. В рамках предложенной им физико-химической модели сейсмичности принципиально возможно оказать влияние на процессы формирования и распада крупномасштабных структур, пространственно связанную блочную структуру путем изменения параметров восходящих потоков легких газов, в частности, активизацией их потоков в канале твердое тело — флюид. Этого, в частности, можно достичь путем воздействий источниками естественной природы и контролируемыми источниками воздействия на пространственно связанную блочную структуру.

Как известно, вариации ОНС среды зависят от парциального давления легких газов во флюиде и твердой фазе. В свою очередь, изменения парциального давления легких газов обусловлены как вариациями их потоков из мантии, так и вариациями концентрации других растворенных во флюиде газов. При этом на их кинетику могут оказывать влияние весьма слабые источники вибрации и электромагнитных полей [Гуфельд, 2007], а отклик такой нелинейной системы на внешнее воздействие может оказаться различным в зависимости от условий самовозбуждения в рассматриваемый момент времени.

Очевидно, можно сказать, что этим мы ответили на вопрос, чем необходимо управлять в системе. Теперь на очереди появляется второй — как управлять процессом. Очевидно, простых решений этой задачи ожидать не следует. Как известно, в открытых конденсированных эволюционирующих системах (средах), для которых часто неизвестными оказываются морфология и параметры состояния, «управление» всецело определяется выбором и подготовкой источника воздействия и контролем доступной группы параметров геосреды. Трудности возрастают в связи с необходимостью влияния на ненагруженный приповерхностный слой литосферы. Он испытывает воздействие в

большей степени фоновых полей: лунно-солнечных приливов, сейсмических волн отдаленных землетрясений, метеофакторов и др. Очевидно, необходимо учитывать действие как внешних, так и внутренних сил.

Об иерархических системах с информационным поведением. Принципиальная сторона рассматриваемой проблемы — у самоорганизующихся систем со сложноорганизованной внутренней структурой появляется возможность расслоения на две тесно связанные друг с другом подсистемы или части — динамическую и информационную [Кадомцев, 1994]. При этом те структурные элементы системы, которые могут сильно влиять на динамику сравнительно малыми возмущениями (импульсами), принято относить к ее структуре управления. Такая возможность появляется в силу большой сложности «фазового портрета» системы [Кадомцев, 1994].

Как известно, у открытых систем с диссипацией фазовое пространство в процессе развития сохраняется и его можно представить разделенным на области притяжения к различным аттракторам — равновесию, периодическим колебаниям или странному аттрактору, одним из которых может быть срыв или разрушение системы. Существенно, что при выведении системы из заданного аттрактора путем внешнего воздействия она будет эволюционировать к другому, зона притяжения которого включает точку ее начального состояния. Иначе говоря, для перевода системы с одного аттрактора на другой ее необходимо перевести с одной области притяжения в другую. При этом оказывается важной не величина основного воздействия, а его информационное содержание, хотя, возможно, существует минимальная мощность, минимальное значение этого воздействия, ниже которого такой процесс перевода невозможен или нереализуем по каким-либо причинам. В этом случае переход от одного аттрактора к другому (в другое стационарное состояние) соответствует преодолению некоего порога. Тем не менее, не только динамический, но и информационный аспект оказывается важным для этого перехода.

Идеи самоорганизации и образования диссипативных структур в открытых системах представляются исключительно актуальными и важными с точки зрения того, чтобы перебросить «мост» между физикой, в которой информационная связь появляется при взаимодействии сложных нелинейных систем со стохастическим поведением, когда малое внешнее воздействие может приводить к сложному изменению ее траектории в фазовом пространстве, и геофизикой. В геофизике оптимизм, очевидно, может быть связан с высокой чувствительностью пространственно-связанных блочных структур геосреды к внешним воздействиям. Одна из задач — это поддержание режима блоков и предотвращение их блокировки. Проблема, однако, состоит в неопределенности как места или конкретной границы разблокировки в пространственно-связанной блочной структуре, так и времени реализации.

Хаос и случайность в геодинамической системе. Как известно, хаотические процессы в геосреде — открытой динамической диссипативной системе, развитие которой определяется глобальными процессами энергетики, дегазации и динамики Земли, — одно из фундаментальных направлений исследований современной геофизики [Гуфельд, 2007; Дмитриевский, Володин, 2008; Геншафт, 2009]. Проявление колебательных движений в геосреде — одна из форм диссипации энергии, поступающей из низов литосферы. При этом спектр колебаний характеризует меру энергонасыщенности системы, а сама геосреда постоянно находится в неустойчивом (неравновесном) состоянии [Лукк и др., 1996]. Как уже отмечалось, в ней существуют комплексы нелинейных взаимодействий между физическими полями, структурами и подсистемами, а кластерная сущность организации является ключом к пониманию функционирования эволюционирующих во времени ее объектов, которые в зависимости от иерархического уровня своей организации проявляют свойства детерминированных, стохастических, хаотических и сложных систем.

Установлено, что хаос может рождаться универсальными способами, независимо от природы динамической системы.

При этом случайность может быть обусловлена как внутренними ее свойствами, так и внешними факторами, а исследуя временные ряды мониторинговых наблюдений, можно отличить случайное, стохастическое (недетерминированное) поведение системы от детерминированного хаоса [Лоскутов, 2010, с. 1327].

Согласно А. Ю. Лоскутову, хаос следует определять как некоторый случайный процесс, наблюдаемый в динамической системе, не подверженной влиянию внешних импульсов или каких-либо случайных сил. При этом критерием отличия между регулярной, но сложной динамикой и хаосом может служить устойчивость системы к малым возмущениям: если она отсутствует, то детерминированное описание поведения системы на больших временах теряет смысл и возникает необходимость перехода к использованию статистических методов.

Необходимое условие возникновения хаоса в динамической системе — размерность ее фазового пространства $N \geq 3$, т. е. состояние системы характеризуется минимум тремя переменными [Анищенко, 1997; Лоскутов, 2010].

Заметим, что под моделью детерминированного хаоса обычно подразумевается модель, представляющая хаотические системы и их динамику и обладающая следующими свойствами: нелинейность, возможность хаотического движения детерминированной системы, «чувствительность» динамических переменных к малым возмущениям в начальных условиях, ограниченность предсказуемости динамики системы (наличие «горизонта предсказуемости»). Режим детерминированного хаоса в нелинейных динамических системах с диссипацией обоснован теоретически и подтвержден многочисленными экспериментами [Лукк и др., 1996; Лоскутов, 2010]. Существенно, что все самоорганизованные критические системы являются слабохаотическими. Большое значение имеет тот факт, что слабый хаос весьма существенно отличается от полностью хаотического поведения, характеризующее временным интервалом, выход за который при прогнозировании их состояния невозможен. Для слабохаотических систем к их числу может быть отнесена и геосреда. Такая характеристика, вообще говоря, отсутствует,

что, в принципе, позволяет делать более долговременный прогноз.

Особенность слабого хаоса состоит в том, что хаотические движения обычно не выходят за определенные рамки, т. е. хотя близко расположенные траектории системы и расходятся экспоненциально, они никогда не удаляются слишком далеко друг от друга [Анищенко, 1997; Дайсон, 2010; Лоскутов, 2010]. Тем не менее, как отмечает Ф. Дайсон, вопрос о том, почему хаос, наблюдаемый в самых различных динамических системах, остается, как правило, «слабым», до настоящего времени остается открытым. С учетом важности проблемы с точки зрения геофизических приложений попытаемся все же его конкретизировать, по крайней мере в отношении геосреды.

Важнейшее свойство сложных динамических систем — их нелинейность. Как известно, целесообразно различать три типа нелинейности: геометрическую, физическую и структурную [Руденко, 2006]. При этом каждая из них может быть распределена в пространстве или сконцентрирована в некоторой его области. Имеется ряд причин, приводящих к появлению больших или даже гигантских объемных нелинейностей структурно-неоднородных сред. К примеру, в жидкостях структурная нелинейность возникает при наличии в ней сильно сжимаемых включений, например пузырьков газа. И вообще, отмечается значительный рост нелинейности сред, содержащих сильно сжимаемые включения. Еще один важный с точки зрения приложений пример сред с большой структурной нелинейностью — это трещиноватые среды. Имеются прямые экспериментальные подтверждения усиления нелинейных свойств среды с ростом числа трещин [Руденко, 2006].

Нарушив режим функционирования рассматриваемой системы малым возмущением, мы вначале, возможно, и будем регистрировать нарастание возмущений в ней. Но это нарастание будет наблюдаться до тех пор, пока в действие не вступит естественный их ограничитель нелинейности — тот или иной (или все три) механизм. В силу ограниченности энергетического потока и энергонасыщенности среды нарастание амплитуды воз-

мущений должно прекратиться или смениться уменьшением их амплитуды. Энергетическая и флюидная подпитка вызывает увеличение неравновесности и неустойчивости системы. Рост неустойчивости приводит к формированию флуктуаций ее параметров и генерации физических полей, которые преобразуются в автоволны, вид и свойства которых определяются самой системой. Они взаимодействуют между собой. Пересекаясь во времени и пространстве, сильные возмущения начинают взаимодействовать, обмениваться энергией, возможно возникновение излучений различной природы непосредственно из областей их взаимодействия в виде новых спектральных компонент. Автоволны, встретившись между собой, гасят друг друга, и имеющейся энергии уже не хватает на увеличение их амплитуды. В неоднородной среде «выживает» наиболее устойчивая и геометрически простая конфигурация со стоячими волнами. Следует отметить также наличие механизмов, переносящих энергию колебаний в более низкочастотную или более высокочастотную области спектра.

Таким образом, нелинейность усиливает поглощение энергии колебаний в геосреде, гигантская же нелинейность сильно увеличивает его. В итоге любой новый режим функционирования системы будет иметь конечную амплитуду флуктуаций с нелинейным ограничением нарастания возмущений в ней.

О регуляции сейсмичности. Итак, приведенные экспериментальные данные дают основание говорить о неустойчивости сейсмического процесса. Основной переменный фактор, определяющий и поддерживающий текущую нестабильность среды, — это восходящие потоки легких газов. Процессы дегазации носят монотонный характер, на фоне которого проявляются импульсы дегазации на различных пространственных масштабах, от регионального до локального. В итоге меняются параметры контактного взаимодействия блоков, которые в значительной степени зависят от интенсивности и скорости процессов дегазации и уровня внешних полей (приливы, метеофакторы, тектоническая деформация, отдаленная сейсмичность и др.). В процессе перестройки структуры геосреды возникают

флуктуации акустической и электромагнитной эмиссий (геометрический шум литосферы, одна из моделей описания которого связана с перколяционной моделью диффузионного фронта). В качестве его модели (фронта самоорганизованной критичности) используют фронты градиентной скалярной перколяции. Существенно, что геометрический, акустический и электромагнитный шум — это универсальный эффект. Он обусловлен только наличием диффузии.

Пороговый характер самоорганизующихся процессов термодинамика связывает с неустойчивостью. Появление новых структур есть результат неустойчивости и флуктуаций. В «допороговом» состоянии флуктуации затухают, а выше порога уже не исчезают, а усиливаются и выводят систему на новый режим. В итоге в принципиальном плане возможно влияние на процессы формирования и распада крупномасштабных структур разрушения. Анализ сейсмического режима по таким параметрам, как сейсмические бреши и затишье, миграция очагов, кольцевая сейсмичность, миграция очагов слабых землетрясений, указывают на значительную неопределенность в оценке сейсмической опасности по времени и месту события. В геосреде существуют комплексы нелинейных взаимодействий между физическими полями, структурами и подсистемами.

Прохождение достаточно слабых упругих сейсмических и электромагнитных импульсов (волн) влияет на динамику восходящих оттоков легких газов и соответственно на изменение ОНС геосреды [Тарасов и др., 2001; Авагимов и др., 2005; Гуфельд, 2007].

К специфическим целям регуляции в геосреде может быть отнесено изменение сейсмичности различного ранга, связанной с разрушением связанного состояния блоков геосреды [Гуфельд, 2007]. При этом можно говорить об управляемости геосистемы, если при вариации входных параметров в диапазоне допустимых значений (по оценкам [Гуфельд, 2007] на кинетику восходящего потока легких газов могут оказывать влияние весьма слабые источники сейсмических и электромагнитных волн с энергией $E \approx 10^{-5} kT$, где k — постоянная Больцмана, T —

температура) области изменения выходного параметра охватывает значения, соответствующие желательному режиму функционирования системы. Очевидно, при таком подходе управление или регуляция еще не является таковым. Существует лишь принципиальная возможность достижения желаемой цели, в частности влияние (в определенных пределах) на формирование и распад крупномасштабных структур разрушения. Важно, что воздействие необходимо оказывать не на всю крупномасштабную структуру, а только на ее отдельные фрагменты, являющиеся главным препятствием к взаимному смещению блоков [Гуфельд, 2007]. В этом случае уместно говорить об ослабленной постановке задачи: создание режимов функционирования системы с заданными характеристиками или качественное изменение ее фазового портрета при минимальных значениях управляющего параметра.

Как известно [Фрадков, 2005], в физических задачах встречаются несколько типов управления системами. Значительное влияние уделялось исследованиям виброиндуцированных или шумоиндуцированных эффектов, которые интерпретировались как задачи управления с управляющей функцией, зависящей только от времени. К таким эффектам могут быть отнесены виброиндуцированный или вибрационный резонанс, стохастический резонанс, синхронизация под действием внешней периодической или случайной силы и т. д. [Фрадков, 2005].

Получило распространение управление с медленно изменяющейся частотой (динамический авторезонанс или чирпинг). Известно управляющее воздействие, в котором при вычислении отклика системы используются результаты измерений объекта управления или его выходов (наблюдаемых). В конечном итоге при решении задачи управления ставится цель нахождения управляющей функции с минимальной нормой, обеспечивающей достижение заданного поведения системы. Однако трудности управления процессами в геосреде в условиях реального эксперимента усугубляются ограниченностью или невозможностью локального контроля и влияния. Главное здесь — за счет контролируемого воздействия уменьшить размер

пространственно-связанной блочной структуры. В этих условиях может оказаться эффективной подача воздействия с медленно изменяющейся частотой, иначе говоря, создание в нелинейной динамической системе (геосреде) колебаний, варьируя частоту внешнего воздействия в зависимости от амплитуды колебаний в ней (воздействие в виде обратной связи). Интерес представляют оценки совместного влияния на среду контролируемого и естественных источников (микросейсм и приливных явлений). В этом случае возможен эффект стохастического резонанса, представляющего собой фундаментально общее физическое явление, при котором отклик нелинейной системы на слабый внешний сигнал заметно усиливается с ростом интенсивности шума в системе. В частности, в отсутствие шума амплитуда вводимого в систему импульса может оказаться недостаточной для достижения порогового значения. С добавлением шума преодоление порога становится возможным [Анищенко и др., 1999]. При этом коэффициент усиления (отношение сигнал/шум) имеет четко выраженный максимум при некотором оптимальном уровне шума в системе.

Установлено также, что наличие источников шума в нелинейной динамической системе может индуцировать принципиально новые режимы ее функционирования, которые не могут быть реализованы в отсутствие шума, например, индуцированные шумом слабозатухающие колебания. Как известно, эффекты такого рода получили название индуцированных шумом переходов [Анищенко и др., 1999].

Но, к сожалению, в отсутствие уравнений процесса воспользоваться или предусмотреть явление достаточно проблематично. Здесь может оказаться эффективным подход, основанный на подаче воздействующего сигнала с медленно изменяющейся частотой (динамический авторезонанс). Иначе говоря, идея состоит в том, чтобы создавать колебания в нелинейной системе (геосреде), изменяя частоту внешнего воздействия в зависимости от амплитуды колебаний в ней.

О технологии воздействия. Как уже упоминалось, имеются весомые основания думать, что сейсмичность любого ранга или

уровня индуцируется фоновыми полями и обусловлена пространственной и временной неравномерностью восходящих потоков легких газов [Гуфельд, 2007; Gufeld et al., 2011; Гуфельд, Матвеева, 2011]. В итоге можно предположить, что образование пространственной структуры блоков в значительной степени зависит и определяется интенсивностью и скоростью процессов дегазации и уровнем внешних полей в данный момент времени. Отражением появления этой пространственно связанной структуры могут быть кольцевая сейсмичность, относительное сейсмическое затишье, сейсмические бреши, исчезновение суточных ходов геоакустической и электромагнитной эмиссии, другие факторы [Gufeld et al., 2011; Шаповал, 2011]. Однако сейчас вряд ли возможно ответить на вопрос о том, в каком месте и на какой границе произойдет разрушение этой пространственно-временной структуры. В то же время можно считать установленной возможность влияния на процессы формирования и распада крупномасштабных структур путем воздействия на параметры входящих потоков легких газов и процессы дегазации в геосреде.

В рассматриваемом контексте значительный интерес представляют исследования виброиндуцированных или шумоиндуцированных эффектов, которые, согласно [Фрадков, 2005, с. 118], можно интерпретировать как задачу воздействия с управляющей функцией, зависящей только от времени: виброиндуцированный (вибрационный) резонанс, стохастический резонанс, шумоиндуцированные переходы, синхронизация с учетом действия внешних естественных периодических (в частности, приливных) или случайных сил (магнитные бури, перепады атмосферного давления и др.). Все эти эффекты существенно влияют на интенсивность и скорость процессов дегазации и соответственно способны коренным образом менять сейсмотектоническую обстановку — от фоновой до критической. Очевидно, определяющую роль здесь имеет то обстоятельство, что акустические возмущения способны проникать в те области геосреды, которые являются непрозрачными для иных видов излучений, в частности электромагнитного. Вопрос

только в том, как эффективно возбуждать в геосреде сейсмоакустические колебания необходимой интенсивности и частоты. В отличие от традиционно используемых и известных технических способов возбуждения ультразвуковых колебаний в среде с применением пьезоэлектрических или магнитострикционных преобразователей может оказаться наиболее эффективным способ, основанный на явлении взаимной трансформации электромагнитных и упругих полей в материальной среде, в частности, электромагнитно-акустического и акустоэлектромагнитного преобразования на границе проводника (ЭМАП) [Васильев, Гайдуков, 1983; Каганов, Васильев, 1993].

Суть ЭМАП состоит в том, что в среде, не обладающей ни пьезоэлектрическими, ни магнитострикционными свойствами, под действием падающей электромагнитной волны возбуждаются ультразвуковые волны той же или кратной частоты. При этом наличие границы раздела сред (в нашем случае «земля—воздух») как места сосредоточения возбуждающей силы, имеет принципиальное значение.

Нетривиальность этого преобразования как физического явления определяется рядом обстоятельств. Во-первых, электромагнитное возмущение (волна), падающее на границу раздела, возбуждает акустические колебания электрически нейтрального тела. Во-вторых, число механизмов, обеспечивающих взаимное преобразование электромагнитных и акустических волн в проводнике, достаточно велико. В-третьих, ряд эффектов, наблюдаемых при изучении его чисто акустических свойств (затухания, скоростей распространения ультразвука) проявляются иногда более отчетливо и выразительно именно в ЭМАП. Последнее обстоятельство, как известно, существенно при разработке методов неразрушающего контроля [Комаров, 1986] и в геофизических приложениях [Шуман, 2012в]. Важно, что упругое поле содержит как компоненты, сосредоточенные в пределах скин-слоя падающей электромагнитной волны, так и возмущения, бегущие за его пределы со звуковой скоростью.

Основой теоретического исследования ЭМАП является связанная система уравнений теории упругости и уравнений

Максвелла, описывающая возбуждение, распространение и взаимодействие распространяющихся возмущений. Установлено, что с точки зрения интенсивности возбуждаемого таким способом в среде ультразвука особенно эффективна генерация стоячих звуковых волн в слоистой структуре. Созданной в ней таким образом звуковой волне сопутствует также электромагнитное поле, характеризующее звуковым законом дисперсии и столь же слабо, как и звуковое, затухающее в пространстве. Его амплитуда в условиях резонанса может оказаться весьма существенной. В работе [Колесников, 2009] приведена следующая простая формула для оценки акустического давления P ЭМАП (μПа) в плоском фрагменте скин-слоя размером $a \times a$ и толщиной b для тока $I_0(A/\mu)$ формы униполярного меандра скважности τ^{-1} с основной частотой ω_1:

$$p = \frac{\mu}{8}\left(\frac{I_0}{a}\right)^2 \left\{\left(1-\delta_1/b\right)\left[1+\operatorname{sgn}\left(\cos\omega_1 t\right)\right]\right\}, \qquad (1)$$

полученная на основе пондемоторной силы Ампера, где μ — магнитная проницаемость среды, σ — ее проводимость, δ_1 — эффективная толщина скин-слоя на частоте ω_1, $\delta_1 = \sqrt{2/\left(\mu\sigma\omega_1\right)}$.

При этом, как уже обсуждалось, нас не должна смущать кажущаяся проблема несоответствия энергетических масштабов процессов в геосреде и мощности p регулятивного импульса: важен поиск частотного оптимума влияния на динамику восходящих потоков легких газов. Заметим также, что, как свидетельствует эксперимент, наблюдается существенное превышение эффективности ЭМАП над его теоретическими оценками [Каганов, Васильев, 1993].

Вторая возможность возбуждения ультразвука в геосреде — когда электромагнитное поле генерируется индуктивной катушкой, расположенной у границы раздела «земля—воздух» или на ее поверхности. Очевидно, первостепенный интерес представляет анализ суммарного воздействия регулятивных сигналов контролируемого источника и шумов различной природы, хотя вопрос о пороге регуляции по существу остается открытым и должен решаться экспериментально. Определяющим

здесь может оказаться не только выбор источника воздействия, но и контроль необходимой (или доступной) группы параметров, характеризующих текущее состояние среды. И здесь на передний план выходят методы идентификации геосреды с непрерывно изменяющимися параметрами.

Алгоритмы воздействия и управления Согласно [Фрадков, 2005], говоря об управлении в распределенных системах, обычно имеется в виду, что в них выделен некоторый параметр, называемый входным или управляющим, вариации которого ведут к изменению некоторой характеристики поведения системы, называемой выходным. В столь ослабленной постановке задачи говорится лишь о принципиальной возможности достижения заданного выхода или результата. Применительно к задачам рассматриваемого нами типа в качестве входного параметра очевидно можно выбрать генерируемую тем или иным способом систему слабых импульсных или периодических акустических сигналов с меняющейся частотой, а в качестве выходного — вариации параметров восходящих потоков легких газов, которые, в свою очередь, вызывают изменения ОНС среды, влияя тем самым на ее пространственно-связанную блочную структуру. При этом, как уже отмечалось, наиболее широкими возможностями обладает управляющее воздействие, вызываемое прохождением слабых упругих волн или электромагнитных импульсов, при котором его характеристики (скважность, частота, интенсивность) оказываются согласованными с текущим состоянием системы, в частности с уровнем шумов в ней (управление с обратной связью или по состоянию — state feed back, или по выходу, характеристикам наблюдаемых временных рядов, характеризующих состояние системы — output feed back) [Фрадков, 2005]. При этом изменение слабой сейсмичности не может быть единственным критерием эффективности воздействия. Ясно, что в плане практической реализации задачи проблемы прогноза сейсмичности и ее регулирования тесно связаны [Гуфельд, 2007]. В этих условиях для синтеза управляющего воздействия недостаточно располагать моделью объекта управления.

Типичным классом моделей активных систем с диффузией являются уравнения «реакция—диффузия» [Кернер, Осипов, 1989; Фрадков, 2005]. При рассмотрении систем с диссипацией и в особенности возникновения флуктуаций особая роль принадлежит флуктуационно-диссипативной теореме статистической физики, связывающей спонтанные флуктуации параметров системы с ее диссипативными свойствами [Ильинский, Келдыш, 1989; Кадомцев, 1994], смысл которой состоит в том, что механизм любой диссипации является одновременно и механизмом рождения флуктуаций.

Таким образом, и сейсмоакустический, и электромагнитный шум литосферного происхождения — это универсальный эффект, обусловленный наличием диффузии [Шуман, 2012в,г]. В частности, предполагается, что источниками сейсмоакустической эмиссии являются фронты переупаковки пород или фронты критичности. При этом критическое состояние на фронте возникает самопроизвольно при внешних энергетических воздействиях, обусловленных, очевидно, и восходящим потоком легких газов, а в качестве модели фронта самоорганизованной критичности предлагается использовать фронты градиентной скалярной перколяции [Гийон и др., 1991; Мухамедов, 1992]. Кроме того, с фронтом самоорганизованной критичности (градиентной перколяции) связано формирование фронта волны тензора комплексной диэлектрической проницаемости, рассеивающейся на отдельных зарядах, сгустках зарядов, электрических диполей, присутствующих в среде или возникающих в ней в процессе распространения фронта самоорганизованной критичности, порождают электромагнитные, а в принципе, и другие типы волн [Гинзбург, Цытович, 1984].

Таким образом, имеются весомые основание предполагать, что динамика и интенсивность спонтанного электромагнитного излучения литосферного происхождения тесно связана и определяется динамикой восходящих потоков легких газов, являющихся объектом воздействия. Как установлено, основные закономерности генерации спонтанного электромагнитного излучения литосферного происхождения могут быть воспроизведе-

ны в рамках двух- или трехкомпонентной системы уравнений, которую в простейшем случае можно записать в следующем виде [Цифра, Шуман, 2010; Шуман, 2012в]:

$$\frac{\partial B_i}{\partial t} = \alpha_{ij}\nabla^2 B_j + F_i\left(\mathbf{B},\mathbf{G}\right),$$
$$\frac{\partial G_i}{\partial t} = \beta_{ij}\nabla^2 J_j + \varepsilon P_i\left(\mathbf{B},\mathbf{G}\right), \qquad (2)$$

где B_i — индукция; α_{ij} и β_{ij} — матрицы диффузии магнитного поля и флюидной компоненты; $F_i(\mathbf{B}, \mathbf{G})$ — сильнонелинейная функция величин **B** и **G**, явным образом независящая от пространственных координат и времени; G — концентрация флюидной компоненты. При этом функция $P_i(\mathbf{B}, \mathbf{G})$ может изменяться скачком в некоторый момент времени, быть монотонной или даже константой. Предельный случай, когда ε=0, соответствует однокомпонентной системе; ∇^2 — оператор Лапласа, задающий диффузионный тип пространственного взаимодействия.

Как известно, системы, свойства которых описываются уравнениями (2), в которых реализуются яркие нелинейные уравнения, принято называть активными системами с диффузией [Кернер, Осипов, 1989]. Установлено, что в рассматриваемом классе систем реализуются два типа нелинейных явлений: спонтанное образование автоструктур и вынужденное образование различного рода автосолитонов и сложных автоволн, в частности возникновение автоструктур большой амплитуды [Кернер, Осипов, 1989]. Обзор возможных подходов к ее решению, а также анализ некоторых особенностей этой системы приведены в работе [Цифра, Шуман, 2010]. В частности, использование симметрийного подхода при анализе системы (1) позволяет в ряде случаев свести эту систему к изучению системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Однако задача управления распределенной активной системой с диффузией на основе системы уравнений (2) остается исключительно трудной как в вычислительном, так и в технологическом отношении. Очевидно, одна из главных проблем — это трудности,

связанные с диагностикой состояния системы, ее мониторинга и реализацией управляющего воздействия на относительно коротких промежутках времени. Они усугубляются необходимостью выделения литосферной компоненты электромагнитного излучения на фоне внешних мощных источников излучений, а также необходимостью ввода управляющего воздействия на ненагруженный поверхностный слой земной коры, сильно фильтрующий сигнал управления. Следующий важный аспект проблемы — необходимость синтеза задачи прогноза (желательно краткосрочного) и управления (влияния) [Шуман, 2013]. Здесь крайне необходим поиск предикторов сейсмических событий, обладающих физическим смыслом, анализ совокупности теоретических и экспериментальных фактов, определение каких-либо качественных или количественных параметров будущего поведения системы на основе имеющегося массива накопленных данных.

Заключение. В работе в рамках физико-химической модели сейсмического процесса проанализированы основные особенности задачи воздействия или влияния на его параметры, представлены некоторые подходы к ее решению. Так как в одной, даже обширной журнальной публикации невозможно осветить все многообразие исследований по этой теме, ее рассмотрение, в основном, ведется в рамках предложенной И. Л. Гуфельдом физико-химической модели сейсмичности. Согласно этой модели, сейсмичность любого уровня в основном контролируется интенсивностью восходящих потоков легких газов, их пространственной распределенностью и степенью разгрузки в приповерхностных слоях земной коры. В качестве ведущего процесса рассматривается взаимодействие блоков. Здесь мы неизбежно сталкиваемся с переходом к нелинейным моделям геосреды и протекающими в ней процессами. Новые постановки задачи потребовали введения новых понятий и описания новых эффектов. В частности, сейсмическая и электромагнитная эмиссия обладают ярко выраженными свойствами нелинейных процессов, способностью к самоорганизации и хаотизации, характерному поведению при приближении к сильному сейсми-

ческому событию и после него. Очевидно, в этой ситуации весьма проблематично построить математическую модель процесса, которая была бы одновременно и реалистичной, и поддающейся анализу. Типичная формулировка задачи воздействия на сейсмичность или управления им: найти управляющую функцию с минимальной нормой, обеспечивающей достижение заданного поведения геосистемы, к примеру формирования или распада крупномасштабных структур разрушения в земной коре. Главное в управлении сейсмичностью — восстановить режим фонового движения блоков. Перспективы в решении этой задачи связаны с высокой чувствительностью пространственно-связанной блочной структуры к внешним воздействиям — естественным и контролируемым.

Естественно, здесь мы сталкиваемся с такими вопросами геоинженерного плана, чем управлять при воздействиях на среду и как это реализовать на практике. Весьма вероятно, этого можно достичь путем воздействия на параметры восходящих потоков легких газов, которые, собственно говоря, и формируют пространственно-связанную блочную структуру и определяют ее эволюцию. И здесь мы сталкиваемся с необходимостью рассмотрения общих вопросов управления физическими системами, теории управления в физике и их адаптацией к реальной геофизической среде.

В качестве теоретической основы влияния на сейсмичность предлагается режим фоновой регуляции процессов дегазации ультраслабыми акустическими сигналами, генерируемыми в скин-слое контролируемый источник в результате интегрального эффекта электромагнитно-акустического преобразования и распространяющимися за его пределами. Весьма важно, что это упругое поле содержит как компоненты, сосредоточенные в скин-слое источника, так и волны, распространяющиеся вглубь среды, т.е. в области, непрозрачные для электромагнитного и других типов излучений. При этом управляющее воздействие может быть не энергетически мощным, а правильно топологически и технологически организованным. Иначе говоря, не энергия воздействия, определяемая как интеграл от спектраль-

ной плотности мощности в полосе измеряемых частот, а его конфигурация и архитектура наиболее существенны. И здесь на передний план выступает совместное воздействие управляющего сигнала, шумов различной природы и периодических внешних сил (приливы, метеофакторы и др.). В итоге проявляется весьма деликатное взаимодействие и согласование проблем прогноза сейсмичности и контролируемого воздействия на нее, причем отклик геосреды на такое воздействие может быть различным в зависимости от условий, в которых она находится в заданный момент времени.

Трудности усугубляются тем обстоятельством, что краткосрочный прогноз сейсмического события в ближайшей перспективе вряд ли реализуем, и мы вынуждены действовать в условиях неопределенности. В качестве фактора, облегчающего решение задачи, могут выступать кольцевая сейсмичность, относительное сейсмическое затишье, сейсмические бреши, нарушение или исчезновение суточного хода геоакустических и электромагнитных шумов, другие параметры. В этом контексте предельно обнажена необходимость комплексного мониторинга, количественная достаточность получаемых параметров, которая, очевидно, может быть установлена лишь на основе представлений физики сейсмического процесса. С дальнейшим развитием этих направлений и связаны надежды на решение проблемы снижения сейсмической опасности или, по меньшей мере, перевода ее в практическую, геоинженерную плоскость.

О феноменологических моделях и прогнозе сейсмичности: оправдан ли пессимизм, обоснованы ли надежды

Геофизический журнал,
№ 2, Т. 35, 2013, С. 24—37.

Введение. Сейсмическая активность, ее прогноз — интенсивно развивающаяся область современной геофизики [Gereller, 1997; Гуфельд, 2007; Gufeld et al., 2011; Шаповал, 2011]. Как известно, сейсмические явления кроме крупномасштабных событий (сильная и средняя сейсмичность) включают слабую сейсмичность, а также непрерывный планетарный микросейсмический шум и криповые подвижки блоков относительно друг друга [Gufeld et al., 2011]. Далее, сейсмическую активность Земли можно представить в виде двух составляющих — глобальной, медленно меняющейся Г-компоненты, и быстро меняющейся М-компоненты [Фридман и др., 2010]. Поле микросейсмических колебаний (сейсмическое шумовое поле) характеризуется широчайшим набором частот от сейсмоакустических (частота более 1 кГц) до сейсмогравитационных колебаний планетарного масштаба (частоты менее 10^{-4}—10^{-5} Гц) [Адушкин, Спивак, 2012].

Наиболее универсальным и не подлежащим сомнению экспериментальным фактом, относящимся к сейсмическому про-

цессу, является установление разнообразных законов подобия, выполняющихся в широком диапазоне масштабов. К ним относятся закон Гутенберга—Рихтера о скейлинговой зависимости частоты повторяемости от энергетического класса землетрясения и закон Кнопова—Кагана для распределения интервалов времени между событиями [Зосимов, Лямшев, 1995]. Введены термины «сейсмический цикл» и «сейсмическая брешь» [Гуфельд, 2007; Шаповал, Шнирман, 2009а,б; Gufeld et al., 2011; Шаповал, 2011].

Как известно, существуют различные подходы к моделированию сейсмичности. В первую очередь, это блоковые модели, основанные на существенно нелинейных дифференциальных уравнениях. Для другого подхода предложены модели, которые лишь имитируют свойства сейсмичности, но порождают закономерности, близкие к наблюдаемым экспериментально [Шаповал, Шнирман, 2009б]. Напомним в этой связи, что в науке модели строятся обычно в два этапа: сначала формулируются так называемые базовые (простейшие) модели. Как правило, они содержат небольшое число переменных и уравнений, но при этом описывают основные черты, суть явления. Далее, применительно к конкретным условиям эти базовые модели усложняются, дополняются, комбинируются и превращаются в имитационные модели [Чернавский и др., 2011]. В качестве примера отметим модель самоорганизующейся критичности (модель БТВ), предложенную Баком, Тангом и Визенфельдом [Bak et a1., 1987], порождающей степенные законы, характерные для сейсмичности и ее модификации [Шаповал, Шнирман, 2009а, б; Шаповал, 2011].

Характерная черта исследований этого цикла — универсальность методологии. Сильная сторона данного подхода заключается в том, что в его рамках работают большие коллективы профессионалов высокого уровня. Его слабая сторона состоит в том, что этот подход ориентируется, в основном, на комплекс исключительно сейсмологических данных. Очевидно, из общности подходов (прогноз крупных сейсмических событий, финансовых крахов и др.) отнюдь не следует качественное

подобие поведения моделей геофизических и экономических систем. Возможно, такая позиция представляется не только малореализуемой, но и несколько самоуверенной. Другая группа моделей изначально опирается на анализ физической природы сейсмического процесса и сильных сейсмических событий как его составной части [Гуфельд, 2007; Gufeld et al., 2011]. Существенно, что понимание особенностей строения среды и движущихся сил сейсмического процесса дает основание для постановки новых работ. Разумеется, эти подходы отнюдь не бросают тень на парадигму самоорганизованной критичности, которая из-за своей простоты и фундаментальности привносит в проблему прогноза широкий взгляд, а анализ временных рядов (наблюдаемых), обладающих фрактальной структурой, — необходимые детали. Однако трудность понимания проблемы прогноза состоит, прежде всего, в онтологической сложности исследуемых геосистем и в многофакторности действия физических полей на различные физически неоднородные и химически изменчивые среды.

Согласно И. Л. Гуфельду, существуют три проблемы, от решения которых зависит возможность построения адекватной модели сейсмического процесса. Первая — это природа процессов, приводящих к поддержанию в среде критических состояний, т. е. энергонасыщенности геосреды, близкой к предельной. Вторая — как в условиях предельной энергонасыщенности геосреды может формироваться в граничных межблоковых структурах крупномасштабный очаг будущего сейсмического события (землетрясения). Третья — физика фонового сейсмического процесса и природа быстрой изменчивости параметров геосреды [Гуфельд, 2007, с. 67]. В этом контексте отчетливо видна необходимость комплексного мониторинга, количественная достаточность параметров которого может быть определена лишь на основе представлений физики сейсмического процесса. В свою очередь, описание самого процесса прогноза сейсмической активности в сильнейшей степени зависит от понимания проблемы, выражающейся в выборе модели. Заметим, что вековой опыт исследований в этой области показал,

что эмпирические подходы к проблеме прогноза уже сыграли свою историческую роль [Гуфельд, 2007]. Однако опыт, полученный на основе анализа данных наблюдений и реальных сейсмотектонических ситуаций, сыграл важную, если не определяющую, роль в развитии представлений о свойствах и процессах в геосреде.

Отмечая многоаспектный и фундаментальный характер исследований сейсмического процесса, заметим, что последующее изложение не является систематическим и достаточно фундаментальным. Цель настоящей статьи — анализ избранных фрагментов проблемы сейсмичности, в частности некоторых интересных, по мнению автора, идей и направлений исследований в этой достаточно проблемной области, еще не нашедших на данный момент должного отражения в литературе. В частности, это механизмы разгрузки геосреды, поддержание режима движения ее блоков и предотвращение их блокировки (волны «маятникового» типа, стохастический резонанс), а также вопросы генерации и распространения сейсмоакустического и электромагнитного шума литосферного происхождения как неравновесного саморганизованного критического явления. И если в отношении микросейсмического шума такая интерпретация не нова, то в отношении электромагнитного — дискуссионна и все еще достаточно ограничена и традиционна [Адушкин, Спивак, 2012]. Напомним в этой связи, что сейсмоэлектромагнитный (спонтанный) шум литосферы — универсальный эффект, не требующий специальных условий для своего возникновения: в соответствии с известной теоремой статистической физики, механизм любой диссипации в среде является одновременно и механизмом рождения флуктуаций [Ильинский, Келдыш, 1989; Кадомцев, 1994; Шуман, 2010а, 2012б, в].

Иначе говоря, он возникает вследствие открытости, активности литосферы и нелинейности развивающихся в ней процессов. Тем самым наблюдаемые вариации геофизических полей понимаются как проявление детерминированного хаоса в иерархически структурированной фрактальной среде. К сожалению, сейчас многие понятия из этих областей сильно форма-

лизованы и абстрактны. Поэтому данное изложение представляет собой в основном качественное изложение, качественную сторону проблемы. Несомненно, здесь необходима широкая дискуссия, включая задачи прогноза и предпосылки постановки мониторинговых наблюдений.

Статья организована следующим образом. В первом разделе приводятся общие сведения о модели геосреды как открытой неравновесной диссипативной системы. В следующем представлены известные положения о динамических системах и динамическом хаосе. Далее обсуждаются возможные «неклассические» механизмы «разгрузки» геосреды, общие вопросы предсказуемости и прогноза, задачи прогноза и фрактального анализа наблюдаемых временных рядов. Обсуждение результатов приводится в заключении.

Геосреда. Как известно, среди множества разнообразных систем, существующих в природе, особенно интересны и важны сложные макроскопические неравновесные системы, содержащие упорядоченные структуры, в которых «порядок рождается из хаоса» [Изаков, 1997]. Геосреда — хороший пример открытой неравновесной диссипативной системы с множеством самоорганизующихся структур.

Напомним, что под структурой системы обычно подразумевают способ организации ее элементов и характер связей между ними. Геосреда непрерывно подвергается воздействию разнообразных внутренних и внешних сил, на нее постоянно действуют флуктуационные и периодические возмущения. Она является активной средой, состоит из множества различных по размерам блоков, перемещающихся как единое целое и взаимодействующих в процессе перемещения. Это перемещение, сосредоточенное, в основном, вдоль границ блоков, включает процессы дробления, деформации и пластического течения отдельностей, зацепления механической и физико-химической природы, объемного деформирования и разрушения в пограничном слое блоков [Даниленко, 1992; Старостенко и др., 2001; Садовский, 2004; Дубровский, Сергеев, 2006; Гуфельд, 2007; Геншафт, 2009 и др.]. При этом в качестве основного перемен-

ного фактора, определяющего текущую нестабильность геосреды вблизи состояния, близкого к критическому, может служить восходящий поток легких газов (водород, гелий и др.), а изменчивость ее параметров, которая, вообще говоря, может быть очень быстрой, является результатом его непрерывного взаимодействия с твердой фазой литосферы [Гуфельд, 2007; Кисин, 2008]. Необходимость описывать такие системы и прогнозировать их эволюцию привели к серии работ, в которых были заложены основы теории самоорганизации. При этом использовались различные подходы и названия: теория самоорганизации или теория диссипативных структур, синергетика, теория открытых систем, информационная динамика и др. [Изаков, 1997]. К сожалению, однако, нелинейно-динамические подходы к анализу геосистем сталкиваются со значительными трудностями, связанными с их необычностью, сложностью, отсутствием понимания архитектуры блоков и принципов межблочных взаимодействий. При этом неустойчивость и пороговый характер их самоорганизации описываются нелинейными уравнениями.

Отличительные признаки нелинейных систем с диссипацией — необратимые изменения во времени, пространственная и временная иерархическая делимость (фрактальность), недетерминированность поведения после прохождения критической точки (бифуркация), волновая (автоволновая) и резонансная природа процессов [Геншафт, 2009].

Идеи самоорганизации и образования диссипативных структур в открытых системах («пятен» организации, блуждающих в геосреде) оказались очень важными с точки зрения установления мостов между физикой и геофизикой. Стала очевидной недостаточность и ограниченность классических представлений о геосреде как континуальной структуре, которые отводили особую роль гладким непрерывным функциям и целочисленным мерам. И хотя эта теория все еще далека от завершенности, уже имеющиеся определенные успехи позволяют надеяться на прогресс в понимании процессов самоорганизации, эволюции геосреды.

Заметим, что в системах с диссипацией в процессе движения фазовый объем сокращается, при этом фазовое пространство упрощенно можно считать разделенным на области притяжения к различным аттракторам. При подпитке энергией извне диссипативная система может испытывать устойчивые колебания (устойчивый цикл в фазовом пространстве), а может перейти в режим сложного стохастического движения, которое получило название странного аттрактора [Зосимов, Лямшев, 1995; Лоскутов, 2010]. Одним из аттракторов может быть разрушение системы. На предельную энергонасыщенность геосреды помимо сейсмоакустической и электромагнитной эмиссии указывают также современные движения, постоянное деформирование среды, характерное как для сейсмоактивных, так и для асейсмичных областей [Gufeld et al., 2011].

О механизмах «разгрузки» среды: маятниковые волны и стохастический резонанс. Предполагают, что устойчивое функционирование геосреды способствует частичной блокировке ее элементов (блоков) и накоплению на их стыках дополнительной упругой энергии при ограниченном их движении [Гуфельд, 2007] и образовании структур, предшествующих крупным сейсмическим событиям [Шаповал, Шнирман, 2009а]. Период неустойчивого функционирования геосреды характеризуется сбросом энергии в блоковых структурах. Полагают, что процессы подготовки очагов сильных землетрясений связаны именно с особенностями взаимодействия блоков (тектонических плит). Однако в конкретной связанной блочной структуре платформ имеется очевидная неопределенность разблокировки конкретной граничной структуры и времени ожидания процесса [Gufeld et al.,2011]. Предполагается, что реализация крупномасштабного разрыва связана с действием процесса триггерного типа. Основанием для такого предположения является высокая чувствительность пространственно связанных структур к внешним воздействиям (лунные приливы, скачки атмосферного давления, микросейсмический шум и др.), которые могут активизировать и ускорять процессы, изменять параметры контактного взаимодействия в граничных структурах. При этом быст-

рая изменчивость параметров геосреды, в частности за счет разгрузки легких природных газов, может кардинально менять геотектонические ситуации от фоновых к критическим и наоборот [Gufeld et al.,2011]. Остановимся на одном частном аспекте проблемы поддержания режима движения блоков и предотвращения их блокировки, остающегося пока за рамками рассмотрения. Речь идет о волнах «маятникового» типа, распространяющихся, в частности, из очаговых зон землетрясений, горных ударов или мощных взрывов в напряженных массивах горных пород блочно-иерархического строения, теоретически предсказанных и экспериментально обнаруженных, ответственных за передачу колебаний в системе массивных блоков и податливых прослоек [Айзенберг-Степаненко, Шер, 2007] (www.misd.nsc. ru/Print/).

Наличие таких относительно податливых прослоек приводит к тому, что деформирование блочного массива происходит в основном за счет деформации прослоек. Отличительные особенности волн «маятникового» типа — их относительно большая длина, малая скорость распространения, значительно меньшая, чем скорость распространения в пределах блоков [Айзенберг-Степаненко, Шер, 2007]. Выделяются два типа волн: низкочастотные и высокочастотные. Существенно, что низкочастотные волны «маятникового» типа отличаются относительно слабым затуханием. Обнаружены волноводные свойства таких волн, обусловленные видом напряженно-деформированнного состояния и блочно-иерархическим строением горных пород. Отмечается возможность реализации резонансных явлений [Айзенберг-Степаненко, Шер, 2007].

В рассматриваемом контексте интересно сопоставить «спокойный» период сейсмической активности с проведением подземных ядерных испытаний в СССР и США, которые интенсивно велись с 1964 г. до конца 1980-х годов. Для этого периода можно говорить об изменении характера сейсмической активности: наиболее сильные землетрясения с магнитудой $m \geq 8{,}3$ полностью отсутствовали [Фридман и др., 2010].

Второй возможный механизм разгрузки геосреды, в известной степени дополняющий рассмотренный выше, связан с наличием в системе геометрического шума, обусловленного процессами диссипации. Известно, что наличие источников шума в нелинейных динамических системах может индуцировать принципиально новые режимы их функционирования, которые не могут быть реализованы в отсутствие шума [Анищенко и др., 1999]. В частности, воздействие шума в нелинейных системах может индуцировать новые режимы, увеличивать степень когерентности и другие эффекты. Один из ярких примеров поведения нелинейных систем при воздействии шума — эффект стохастического резонанса [Анищенко и др., 1999, Климонтович, 1999].

Как известно, эффект стохастического резонанса представляет собой фундаментально общее физическое явление, типичное для нелинейных систем, в которых с помощью шума можно контролировать или влиять на один из характерных временных масштабов системы. Так, отклик нелинейной системы на слабый внешний сигнал заметно увеличивается с ростом интенсивности шума в системе. Важно, что при одновременном воздействии периодического сигнала (к примеру, лунного прилива) и шума существует некий оптимальный уровень интенсивности шума, при котором периодическая компонента усиливается максимально. Заметим, что если бы геосреда представляла собой чисто релаксационную систему, в которой отсутствуют собственные частоты, то резонанс в классическом понимании этого термина невозможен.

Примечательно, что стохастический резонанс демонстрирует семейство явлений, которые имеют место при совместном воздействии сигналов и шумов на нелинейные системы. К наиболее интересным, очевидно, можно отнести явление индуцированной шумом упорядоченности, которая возникает при стохастической синхронизации, а также возможность физического понимания и реализации условий, при которых происходит или не происходит разгрузка среды, поддержание режима движения отдельных блоков и предотвращение их блокировки. Яс-

но, что при этом сложности в реализации прогноза возрастают. Здесь на передний план выходят методы, контролирующие колебательный режим блоковой структуры, поиск и мониторинг формирующихся крупномасштабных структур разрушения. И только накопленные факты и результаты покажут их эффективность. В этой связи небезынтересно вспомнить о стратегии Джона фон Немана по управлению погодой, высказанной им в еще не столь далеком 1950 г. [Дайсон, 2010], всячески избегая возможных параллелей и аналогий с рассматриваемой выше проблемой. Фон Неман предложил разбить атмосферу в каждый момент времени на устойчивые и неустойчивые области. При этом поведение устойчивых областей вполне предсказуемо, а неустойчивыми областями можно управлять путем приложения точно выверенных дозированных малых возмущений. И тогда управление погодой станет обычным делом. Но, как отмечает Ф. Дайсон, фон Неман ошибался, так как не знал о хаосе: если движение хаотично, то малые возмущения (контролируемые или шумовые) не смещают его в области устойчивости, где прогноз реализуем, и, как следствие, эта стратегия не работает. Теперь о хаосе мы кое-что знаем, но достаточно ли этого для понимания реальности задачи? Ведь проблема слабого хаоса все еще остается нерешенной.

Можно было бы попытаться сформулировать задачу в ослабленной постановке, потребовав, чтобы только существенные свойства динамической системы (геосреды) сохранялись при малых возмущениях. Но при этом в каждом конкретном случае необходимо определить, какие именно возмущения возможны и допустимы с нашей точки зрения, существенные для исследуемой системы. По этой причине на передний план выходят исследования устойчивости, изучение роли инвариантных многообразий и характеристик, анализ геометрической структуры траекторий и т. п. [Лоскутов, 2010]. Очевидно, такой подход позволит на качественном уровне описать и понять некоторые важные особенности динамической системы, в том числе и хаотичность.

Динамические системы и динамический хаос. Как известно, под динамической системой понимают систему любой природы, состояние которой изменяется во времени. Для динамических систем общепринятым представлением развития процесса во времени является построение «портрета» в фазовом пространстве — совокупности характерных фазовых траекторий. Важнейшая характеристика этого пространства — его размерность — наименьшее число независимых переменных, однозначно определяющее установившееся движение динамической системы.

Математические модели реальных процессов представляют собой, как правило, системы нелинейных дифференциальных уравнений. Их решения обладают большим разнообразием, описывая качественно различающиеся режимы (состояния). При этом реализация той или иной определенной структуры решения из числа возможных зависит как от предыстории процесса, так и от условий, которые могут изменяться в пространстве и времени. Ясно, что при изучении сложного поведения динамических систем обычный подход, состоящий в аналитическом вычислении индивидуальных траекторий дифференциальных уравнений, как правило, не работает [Лоскутов, 2010].

Динамические системы условно можно разделить на два типа. У первых траектории движения устойчивы и не могут быть значительно изменены малыми возмущениями. Такие системы предсказуемы. Небольшие изменения в значении параметров начальных условий приводят лишь к несущественной погрешности в прогнозе. К другому типу относятся динамические системы, поведение которых неустойчиво, так что любые сколь угодно малые возмущения быстро (в масштабе времени, характерном для рассматриваемой системы) приводят к кардинальному изменению траектории. Предсказание в таких системах теряет смысл: прогноз будущего оказывается далеко не всегда возможным.

Исследования в области динамически нелинейных систем привели к одному из важнейших открытий XX века — открытию динамического хаоса. Динамический (детерминированный)

хаос — явление в теории динамических систем, при котором поведение нелинейной системы выглядит случайным, несмотря на то, что оно определяется детерминистскими законами. Причина его появления — неустойчивость (чувствительность) по отношению к начальным условиям и параметрам. Согласно работе [Лоскутов, 2010, с. 1306], «хаос следует определить как некоторый случайный процесс, который наблюдается в динамических системах, не подверженных влиянию шумов или каких-либо случайных сил». Иначе говоря, хаос порождается собственной динамикой нелинейной системы — ее свойством экспоненциально быстро разводить сколь угодно близкие траектории.

Актуален вопрос: где провести границу между регулярной, но сложной динамикой и хаосом? Ответ на этот вопрос не так прост. Как известно, существует несколько определений понятия хаотичности [Лоскутов, 2010, с. 1309]. Наиболее часто используемое определение опирается на свойство экспоненциально сильной чувствительности системы к заданию начальных условий или к внешним воздействиям, а также к использованию показателей Ляпунова и энтропии в качестве критериев динамического хаоса. Однако для определения понятия хаоса одной экспоненциальной неустойчивости оказалось недостаточно. Недавно было предложено определение хаотичности динамической системы, которое помимо чувствительности от начальных условий включает и требование сложности траектории [Лоскутов, 2010, с. 1309], где под сложностью понимается отсутствие рекуррентности. Тем не менее под моделью детерминированного хаоса обычно подразумевается модель, представляющая хаотические системы и их динамику и обладающая следующими свойствами: нелинейность, возможность хаотического движения детерминированной системы, «чувствительность» динамических переменных (и характера траекторий системы) к малым возмущениям в начальных условиях, ограниченность предсказуемости динамики системы (наличие «горизонта предсказуемости»).

Существенно, что полностью хаотические системы характеризуются временными масштабами, за которыми невозможны какие-либо предсказания. В то же время слабохаотические системы переходят такой масштаб и тем самым позволяют, в принципе, делать более долговременный прогноз.

Напомним, что слабый хаос отличается тем, что хаотические движения зачастую не выходят за определенные рамки, т. е., хотя близко расположенные траектории и расходятся экспоненциально, они никогда не удаляются далеко друг от друга. Расхождение траекторий начинается с экспоненциального, но дальнейшее удаление ограничено [Дайсон, 2010]. Однако «слабый» или «сильный» хаос не представляет весь континуум степеней хаоса. В итоге, когда используется термин «хаос», необходимо иметь ввиду «слабый хаос», «среднюю хаотичность», «сильный хаос», «грань хаоса» или «хаос как метафору» (http/spkurdyumov.narod.ru/Goldstein.xtm).

Принципиальный результат — слабый хаос очень распространен в природе: все критически самоорганизованные системы слабохаотичны. Слабость хаоса — ключевые условия сохранения жизни на Земле [Дайсон, 2010]. Среда и слабый хаос оказываются, таким образом, «приспособленными» к нашему выживанию. Все это соответствует известному в физике антропному принципу или напоминает его: Вселенная представляется наблюдателю гармоничной и «приспособленной к нему потому, что во Вселенной с другим устройством наблюдатель не возникнет». Тем не менее вопрос, почему хаос, наблюдаемый в самых различных динамических системах, остается как правило «слабым», является открытым [Дайсон, 2010].

Напомним, что теория самоорганизованной критичности описывает состояние системы на границе хаоса и порядка, т. е. на «кромке хаоса». Системы в таком состоянии являются ни в полной мере регулярными, предсказуемыми, ни в полной мере хаотическими, непредсказуемыми [Бак, Чен, 1991]. При этом выделяют следующие основные функции хаоса в процессе самоорганизации:

– хаос необходим для выхода системы на один из ее аттракторов;
– хаос лежит в основе механизма объединения простых структур в сложные;
– хаос может выступать как механизм смены режимов в развитии системы, перехода от одной относительно устойчивой структуры к другой.

Изложенное нуждается в комментарии. Заметим, что динамическая система представляет собой лишь модель некоторой реальной физической системы. В то же время любая модель, приводящая к хаосу в динамической системе, помимо динамических законов и задания начальных условий должна учитывать еще и действие флуктуаций. Причем, с точки зрения динамики эти флуктуации имеют привнесенный характер, и их можно интерпретировать либо как множество независимых случайных воздействий на систему, либо как самоактивность ее элементов [Шарыпов, 2001, с. 76—77]. В итоге детерминированный хаос «...существенно обязан своим возникновением не только действию детерминистских законов, но и наличию статистических (недетерминированных в рамках теоретического описания) факторов» [Шарыпов, 2001]. Иначе говоря, динамическая система, переходя к хаотическому режиму, не просто усиливает этот «слабый шум» благодаря ее неустойчивости, но, что важно, без этих слабых случайных возмущений хаос возникнуть не может. Следовательно, математическая модель неравновесного процесса с возможным хаотическим характером должна наряду с нелинейными дифференциальными уравнениями, отражающими аспект необходимого в явлении, учитывать в формализованном виде также и эффект флуктуаций, носящий характер случайного. Как уже отмечалось, эти флуктуации могут быть связаны с переменным тепловым потоком из земных недр, обусловленным также и восходящей диффузией легких газов, содержащей как слабопеременную, так и импульсную компоненты. В итоге реализуются условия для возникновения фрактального геометрического шума [Зосимов, Лямшев, 1995].

Очевидно, такая трактовка в известной степени противоречит классическим определениям, в соответствии с которыми хаос может происходить в динамической системе при полном отсутствии каких-либо факторов внешнего или внутреннего происхождения, т. е. хаотическое поведение решения возможно при условии полной абстрагированности математической модели от случайных факторов. В то же время, согласно И. Пригожину, именно флуктуации запускают нестабильности. Но, как известно, любая реальная система подвержена флуктуации и потому, вообще говоря, не может быть динамической [Филатов, 2008]. Можно предположить, что в этом и состоит решение упомянутой дилеммы, однако проблема слабого хаоса все еще остается нерешенной.

О предсказуемости и прогнозе. Как уже отмечалось, системы, с которыми мы имеем дело в геофизике, весьма сложны и поэтому задача прогноза сейсмической активности в сильнейшей степени зависит от нашего понимания проблемы, выражающегося в выборе модели. Ясно, что при изучении поведения таких систем обычный подход, основанный на детерминистских представлениях о континуальной модели геосреды, уже выполнил свою историческую роль [Лукк и др.,1996; Гуфельд, 2007]. Показана недостаточность представлений физики и механики разрушения лабораторных образцов горных пород для анализа процессов подготовки очагов сильных сейсмических событий [Гуфельд, 2007]. Стала очевидной необходимость смены «детерминистской» прогнозной парадигмы. С этой точки зрения оказались очень важными и востребованными идеи о самоорганизации и образовании диссипативных структур в открытых системах, представления о динамических системах и динамическом хаосе. При этом динамический хаос вносит радикальные изменения в понимание того, как геосреда может вести себя во времени. Ряд подходов к проблеме прогноза заимствован из теории динамических систем и теории катастроф [Лукк и др.,1996; Шаповал 2009а, б, 2011 и др.].

Однако нелинейно-динамический подход применительно к геосреде сталкивается со значительными трудностями. Как из-

вестно, такие системы способны формировать весьма различные пространственно-временные структуры. Тем не менее, несмотря на трудности, нелинейно-динамический подход уже успешно применяется и продолжает эффективно развиваться в наше время. В частности, получен ряд результатов о динамике геосреды, многие виды ее активности получили адекватную интерпретацию в терминах динамических систем. Такие понятия, как регулярные и хаотические структуры, устойчивость, область притяжения, бифуркации и другие, прочно вошли в обиход направления исследований, связанного с изучением литосферы как открытой системы методами нелинейной динамики [Геншафт, 2009; Шаповал, Шнирман, 2009а, б; Шуман, 2010а, 2011а,б, 2012в]. Анализ структуры разбиения фазового пространства, в первую очередь исследование аттракторов (состояний равновесия, предельных циклов), различных интервалов позволяет охарактеризовать возможные типы поведения системы.

Важный постулат — самоорганизованные критические системы являются слабохаотичными. Иначе говоря, слабый хаос — результат самоорганизованной критичности. При этом система эволюционирует на грани хаоса, а само землетрясение — слабохаотическое явление. Однако реальный прогноз сейсмических событий основан на анализе предшествующих ему явлений (предвестников).

Как известно, для изучения, в том числе экспериментального, свойств сложных систем широко используется подход, основанный на анализе сигналов, произведенных системой. При этом задача прогноза в общем случае ставит своей целью определение каких-либо качественных или количественных параметров будущего поведения временного ряда на основе всего массива имеющихся предшествующих данных. При этом, разумеется, особый интерес представляет задача определения ранних предвестников критического поведения ряда [Дубовиков, Старченко, 2011]. Выясняется, что особую роль здесь играет эффект увеличения крупномасштабных колебаний при уменьшении мелкомасштабных. Как отмечают М. М. Дубовиков и Н. В. Старченко, этот эффект является результатом того, что

степенной закон для некоторой функции (амплитуды) выполняется на большом интервале временных масштабов, а также специфических свойств степенной функции [Дубовиков, Старченко, 2011, с. 785].

Эффект резкого уменьшения мелкомасштабных колебаний в настоящее время при определенных условиях может стать предвестником сильных крупномасштабных колебаний, а в будущем означает, что тенденции в сложных системах, формирующихся достаточно медленно, со временем определяют основной вектор развития системы. Напомним, что для систем с перемежаемостью типа «хаос—хаос» среднее время T нахождения фазовой траектории на аттракторе соответствует универсальным закономерностям вида

$$T_i \approx \left(a - a_{\text{кр}}\right)^{\gamma},$$

где a — нелинейный параметр системы; $a_{\text{кр}}$ — пороговое бифуркационное значение параметра, при котором реализуется кризис; γ — универсальная постоянная.

Упомянутый эффект тестирования на базе финансовых данных проявляет себя с вероятностью 70—80 % и даже выше [Дубовиков, Старченко, 2011]. Заметим, что эффект затишья, предшествующий некоторым землетрясениям, является частным проявлением указанного эффекта. Однако наиболее известный и изученный предвестник — повышение сейсмической активности в интервалы времени, предшествующие сейсмическому событию, хотя некоторым из них свойственно сочетание активности и затишья в разных пространственно-временных интервалах [Шаповал, 2011]. Парадигма самоорганизованной критичности оказалась востребованной. На основе найденных предвестников построены алгоритмы, достаточно эффективно реализующие в ряде случаев среднесрочный и краткосрочный прогноз для отдельных регионов [Шаповал, Шнирман 2009а,б, 2011]. Один из наиболее разработанных алгоритмов, по-видимому, является алгоритм M8 [Keilis-Borok, Kossobokov, 1990; Kossobokov, Keilis-Borok, 1999].

В дальнейшем было показано, что в рамках типичных систем с самоорганизованной критичностью можно построить модель сейсмического процесса, крупные события которой прогнозируемы с помощью адаптированных предвестников реальных землетрясений (модельная система лавин sand pile — куча песка) [Шаповал, Шнирман, 2009а,б]. При этом предвестники лавин (процесс пересыпания песчинок) взяты из алгоритма M8. Они определяются количеством событий, отключением от линейного тренда, концентрацией. В результате построена модель с самоорганизованной критичностью, являющаяся модификацией модели Бака—Танга—Визенфельда, обладающая (в отличие от классической модели БТВ) активизационным сценарием сильных событий [Шаповал, 2011].

В ее рамках удалось предсказать около 80 % целевых событий и таким образом показать, что существующее представление о самоорганизации сейсмического процесса в принципиальном плане согласуется с предсказуемостью сильных землетрясений [Шаповал, 2011]. В то же время непосредственное применение модели БТВ к прогнозу сейсмичности затруднено, так как она не воспроизводит буквально физику процесса, не демонстрирует активизации сейсмичности перед крупными событиями, обладает универсальным показателем в законе повторяемости Гутенберга—Рихтера.

Однако многие исследователи считают используемые предвестники (в частности, предвестники лавин) «нефизичными», а имеющиеся результаты прогноза — ненадежными. Более того, некоторые известные ученые, опираясь на закон Гутенберга—Рихтера, продолжают утверждать, что прогноз землетрясений в принципе невозможен [Geller, 1997]. Наряду с этим высказывались также мысли о случайном по времени появлении сейсмических событий. Иллюстрацией сказанного, на первый взгляд, является пропуск особо разрушительного японского землетрясения 11 марта 2011 г., хотя условия для мониторинга были уникальными (мониторинг зоны осуществлялся непрерывно и на протяжении длительного времени). Но, как отмечает И. Л. Гуфельд, такой вывод делается лишь на основе негативного опыта

прогноза, а не на анализе природы сейсмического процесса и сильных сейсмических событий [Гуфельд, 2007; Gufeld et al., 2011].

Напомним, что мысль о принципиальной ограниченности нашей способности предсказывать поведение системы (в современной терминологии — говорить о существовании горизонта прогноза или пределов предсказуемости (см., например, [Кравцов, 1989]) даже в том случае, когда система описывается в рамках классической механики, была высказана Ричардом Фейнманом еще в 1963 г. Однако следует отличать глобальную непредсказуемость от локальной в зоне бифуркаций. Термин «локальная непредсказуемость», очевидно, введен для того, чтобы как-то смягчить радикальность высказываний и оценок в этой области исследований и приблизить их к реальности.

Таким образом, мы оказываемся в ситуации, когда «следует либо считать недостаточно обоснованными результаты прогноза землетрясений, либо поставить под сомнение самоорганизацию сейсмических процессов, либо уточнить гипотезу о непредсказуемости типичных систем с самоорганизованной критичностью» [Шаповал, 2011]. В то же время А. Б. Шаповал утверждает, что широкий класс сложных систем с самоорганизованной критичностью предсказуем с помощью универсальных предвестников.

Разумеется, не стоит думать, что грубая, достаточно упрощенная модель Бака—Танга—Визенфельда или ее модификации даст правильные параметры распределения реальных землетрясений, хотя теория самоорганизованной критичности и объясняет в общих чертах их эволюцию. Более того, алгоритмы, основанные на эмпирических признаках, как правило, необучаемы. Тем не менее феноменологический подход к описанию сейсмической активности несомненно указывает на ряд возможных перспективных направлений в исследовании проблемы. В то же время нельзя исключать того, что реальный краткосрочный прогноз эпицентральной зоны готовящегося события, очевидно, не удастся реализовать с необходимой точностью. С этой точки зрения «... универсальность методологии прогноза

крупных землетрясений анализом последовательности крупных падений наиболее значимых финансовых индексов» [Шаповал, 2011] без учета физической стороны процесса представляется крайне оптимистичной даже с учетом ее изящества и в этом смысле может рассматриваться как плод изощренного математического интеллекта. Физические механизмы и процессы здесь обычно не обсуждаются или обсуждаются крайне недостаточно. Напомним, по мнению И. Л. Гуфельда, главные:

– природа процессов, приводящих к поддержанию в геосреде энергонасыщенности, близкой к критической, предельной;

– механизмы формирования в условиях предельной энергонасыщенности геосреды в граничных структурах ее блоков крупномасштабного очага будущего сильного землетрясения;

– физика фонового сейсмического процесса и природа быстрой изменчивости параметров геосреды [Гуфельд, 2007; Gufeld et al., 2011].

Следовательно, имеются все основания говорить о необходимости комплексного мониторинга геосреды, достаточность параметров которого может быть установлена лишь на основе представлений физики сейсмического процесса. Иначе говоря, невозможно заранее выяснить, аномалии или возмущения каких полей могут реализоваться и наблюдаться. Необходимо понять их взаимосвязь и взаимообусловленность, природу инициирующих сил и процессов. К сожалению, несмотря на значительные успехи в изучении геосреды, должного понимания этих проблем не достигнуто, чему в значительной степени способствовало также использование неадекватных методов мониторинга геосреды. Однако только увеличение плотности сетей мониторинга не является ее решением [Gufeld et al., 2011].

Как отмечают авторы, несмотря на многолетний мониторинг, реально не удалось обнаружить краткосрочные признаки — предвестники сильных землетрясений литосферы, связанные с прогнозируемым местом их проявления. При этом наиболее перспективным для отработки методологии краткосрочного прогноза сейсмичности, по их мнению, являются методы спутникового мониторинга ИК-излучения: именно свечение отдель-

ных границ между блоками в ИК-излучении указывают на активизацию сброса энергии геосредой.

Перспективы использования с этой целью вариаций электромагнитного, геомагнитного и теллурического полей, активизацию локального выхода радона, мониторинга волноводного распространения естественных электромагнитных полей (атмосфериков) и т. д., особенно в свете краткосрочного прогноза эпицентральной зоны, представляются автором сомнительными: «сильные сейсмические события не обусловлены непосредственно процессами в зонах возмущений или активизации и не связаны с ними».

Однако с радикальностью оценок такого рода согласиться трудно. Выяснение закономерностей формирования и эволюции геофизических полей имеет принципиальное значение для понимания пространственной и временной связи их аномалий с процессами подготовки землетрясений. Возможно, такому выводу способствовали узкие рамки традиционных представлений о механизмах генерации геометрического шума литосферы — и сейсмоакустического, и, особенно, электромагнитного. Как известно, геометрический шум как продукт своеобразного механизма эволюции перколяции внедрения (динамики проникающей перколяции) — универсальный эффект и может проявляться при генерации волн различной природы [Гийон и др., 1991; Шуман, 2012в]. Его электромагнитная составляющая — спонтанная электромагнитная эмиссия литосферного происхождения — относительно просто детектируема, в том числе и с космических аппаратов, и может служить хорошим дополнением спутникового мониторинга ИК-излучения.

Напомним в этой связи также возможную роль стохастического резонанса при реализации условий и механизмов разгрузки геосреды относительно слабым сейсмическим шумом. Тем не менее остается острым вопрос о том, являются ли рассматриваемые параметры достаточно информативными, отражают ли они в должной мере текущее состояние геосреды и тенденции ее развития?

Задачи прогноза и фрактальный анализ временных рядов. Одно из важных и эффективных направлений исследований геосистемы связано с изучением сигналов, продуцируемых ими. Это особенно актуально в том случае, если математически описать изучаемый объект (систему) и процессы в нем практически невозможно, но является доступной для наблюдения некоторая характерная величина (наблюдаемая). Напомним, что «временной ряд» или наблюдаемая — это последовательность значений некоторой переменной или переменных, регистрируемых непрерывно или с некоторым интервалом.

В теоретическом и прикладном плане представляется важным формализованный поиск во временных рядах геофизического мониторинга спектра нестационарностей и коллективных эффектов различного рода. Эта задача часто рассматривается и решается с использованием идей и методов нелинейной динамики: прогноз поведения, выделение квазистационарных участков, прогноз бифуркаций и др. Однако нелинейно-динамический подход при изучении геосистем наталкивается на значительные трудности: вполне вероятно, что всеобъемлемой единой модели реальной геосреды, описываемой конечной системой дифференциальных уравнений, просто нет. Существует реальная возможность различного физического содержания процессов генерации, наблюдаемых (в частности, сейсмоэлектромагнитного шума) на разных уровнях геометрически самоподобной блоковой системы геосреды, а сама система является иерархией подсистем.

Ясно, что наличие только лишь временного ряда сильно ограничивает возможности получения информации об изучаемой системе. В прикладном плане при анализе временных рядов выделяются две основные задачи: задача идентификации и задача прогноза [Лоскутов, 2010].

Задача идентификации состоит в изучении вопроса о том, каковы параметры системы, породившей временной ряд, а задачей прогноза — предсказание характеристик изучаемого объекта по данным наблюдений на некоторый отрезок времени вперед. Разработанные к настоящему времени методы анализа

временных рядов, генерируемых некоторой системой, позволяют в ряде случаев получить такие ее характеристики, как энтропия, показатели Ляпунова, размерность [Лоскутов, 2010]. В принципиальном плане это дает возможность, основываясь только на экспериментальных данных, оценить горизонт прогноза рассматриваемого процесса и в некоторых случаях предсказать дальнейшую эволюцию системы.

За последние 10—15 лет растут популярность и успех применения фрактальных моделей в физике и геофизике. Успех в применении фрактальных моделей обусловлен, по мнению В. В. Зосимова и Л. М. Лямшева, прежде всего тем, что фрактальные формы присущи огромному числу процессов и структур [Зосимов, Лямшев, 1995].

Важнейший класс естественных фракталов составляют хаотические временные ряды, генерируемые динамической системой (геосредой) и имеющие крайне нерегулярный характер поведения. Простейший способ исследования фрактальной структуры таких рядов основан на вычислении показателя размерности *Б.* Ее особая важность для хаотических временных рядов обусловлена тем, что этот показатель тесно связан с показателем Херста *H,* который, в свою очередь, является показателем персистентности ряда, т. е. способности к сохранению тенденции его изменения [Дубовиков, Старченко, 2011]. При этом особый геофизический интерес представляет задача определения ранних предвестников критического поведения временного ряда.

С учетом важности этого показателя при анализе временных рядов разработано несколько различных алгоритмов его вычисления. Простейшие из них, очевидно, основаны на использовании соотношений

$$\left\langle \left| f(t+\delta) - f(t) \right| \right\rangle \approx \delta^H \text{ при } \delta \to 0,$$

$$\left\langle \left[f(0) - f(t) \right]^2 \right\rangle \approx t^{2H},$$

где угловые скобки означают усреднение по временному интервалу, $f(t)$— значение временного ряда в момент времени t. Для гауссовых случайных процессов $H=2-D$, но предполагается, что это соотношение имеет значительно более широкую об-

ласть применимости [Дубовиков, Старченко, 2011]. Однако для определения H требуется весьма значительная длина временного ряда, репрезентативный его масштаб. Но на таком временном масштабе временной ряд, как правило, может изменить характер своего поведения даже несколько раз, что значительно усложняет и затрудняет анализ временных рядов с помощью показателя Херста H. По этой причине в работах [Дубовиков, Старченко, 2011] вводится новый характерный показатель — индекс фрактальности μ, являющийся более локальной характеристикой, требующей для своего определения с приемлемой точностью данных на значительно более коротком временном интервале. Это позволяет рассматривать его в качестве индикатора локальной стабильности ряда. При этом чем больше индекс фрактальности μ, тем стабильнее ряд.

Существенно, что, исследуя временные ряды наблюдаемых, в принципе можно отличить стохастическое поведение системы от детерминированного хаоса, установив таким образом конечномерность изучаемого процесса. Как известно, в рамках теории детерминированного хаоса для моделирования хаотического компонента ряда наблюдений необходимы системы динамических уравнений относительно невысокой размерности (3—4). Напомним в этой связи, что системы размерности 2 не могут иметь странных аттракторов и, соответственно, не могут иметь хаотического поведения [Смирнов и др., 2005].

Заметим, что данное направление исследований приобретает все большую популярность. Таким образом, намечается смена парадигмального подхода к изучению геосреды — смена детерминистской парадигмы на парадигму нестационарных флуктуаций геофизических полей [Лукк и др., 1996; Смирнов и др., 2005]. Ясно также, что поиск предвестников — исключительно трудная задача.

Заключение. Наиболее развитый, стандартный подход к описанию сейсмичности — это феноменологический подход. Несмотря на то, что в этом подходе возникает значительное число параметров, подлежащих экспериментальному определению, он представляется привлекательным в силу относительной простоты и безмодельности.

Существуют различные способы моделирования сейсмичности. Одни из них базируются на нелинейных дифференциальных уравнениях, описывающих взаимодействие блоков в геосреде. Для других характерны модели, которые лишь имитируют свойства сейсмичности, однако за счет своей простоты и фундаментальности оказались весьма полезным инструментом исследований. Применение теории фракталов, которые можно рассматривать в качестве «мгновенных срезов» самоорганизованных критических процессов, детерминированного хаоса, скейлинговых эффектов открывают дополнительные возможности и перспективы в задачах прогноза и повышения информативности мониторинговых систем наблюдения.

Очевидно, основные проблемы прогноза сейсмичности обусловлены и связаны с недостаточным пониманием физики процессов в геосреде, контролирующих подготовку и реализацию сейсмических явлений, в том числе кризисных сейсмических ситуаций. Возможно, что всеобъемлющих моделей реальной геосреды, которые могут быть описаны конечной системой дифференциальных уравнений, просто не существует. Может также оказаться, что размерность степеней свободы рассматриваемой системы — геосреды как активной нелинейной динамической системы — очень велика, чтобы попытаться обнаружить в ней динамику.

Трудности решения проблемы прогноза состоят также в онтологической сложности исследуемых систем и в многофакторности действия физических полей на физически неоднородные и химически изменчивые среды. Однако проблема все же не выглядит безнадежной, хотя реальность и эксперимент свидетельствуют зачастую об обратном. Весьма обнадеживающий момент — самоорганизованные критические системы являются слабохаотичными. Слабость хаоса — ключевое условие существования и сохранения земной коры на протяжении длительного времени развития Земли.

Как известно, слабохаотические системы, в отличие от полностью хаотических, в принципе позволяют осуществлять относительно долговременный прогноз. Это привносит в пробле-

му прогноза определенные перспективы и более широкий взгляд, а анализ временных рядов (наблюдаемых), обладающих фрактальной структурой, важные детали. Однако оптимизм теоретиков моделей «кучи песка» (sand pile) и их формальных обобщений в отношении универсальности методологии прогноза сейсмичности, последовательности крахов на фондовых рынках наступления рецессий и т. д., которые считаются «главным течением» (мейнстримом) на современном этапе, все же представляется недостаточно обоснованным и очевидным.

Физический смысл, механизмы и процессы в системе в том лучае не обсуждаются и остаются, так сказать, «за кадром». И все же имеющиеся алгоритмы прогноза могут служить полезным инструментом принятия решения, в частности, в вопросах организации, развертывания и функционирования сетей мониторинга. И, наконец, обратим внимание на парадоксальность ситуации — хотя в настоящее время и имеются определенные, пусть и скромные возможности прогноза сейсмичности, эти результаты обычно оказываются ненужными или слабовостребованными при выработке стратегии нашего поведения.

Так необходим ли прогноз? Не может ли оказаться так, что его основное достоинство — это возможность опровержения. И, наконец, зададимся еще одним важным вопросом: чем же все-таки фактически ограничивается точность прогноза — погрешностями, связанными с неточностью и неполнотой данных наблюдений, многофакторностью внешних воздействий на геосреду или дефектами модели? Можно думать, что все эти факторы вносят ощутимый вклад в ограничения возможностей прогноза. Расширяя мониторинговую сеть наблюдений и одновременно совершенствуя модель, очевидно можно продвинуться в решении проблемы прогноза. В то же время успех динамического подхода в сильнейшей степени зависит от удачно выбранной модели, понимания процессов, контролирующих подготовку, и протекание сейсмических явлений. Отчетливо видна также необходимость комплексного мониторинга и комплексного подхода в решении проблемы.

Обобщенное уравнение генерации спонтанной электромагнитной эмиссии во фрактальной среде

Геофизический журнал,
№ 3, Т. 35, 2013, С. 46—53.

Введение. Как свидетельствует эксперимент, наблюдается большое разнообразие электромагнитных возмущений, регистрируемых на границе раздела «земля—воздух» или приземленной атмосфере в исключительно широком диапазоне частот от 10^{-4} до 10^{6} Гц и выше. Одни из них возбуждаются источниками в атмосфере (грозовые разряды, предгрозовое излучение, непрерывно-шумовое радиоизлучение грозовых облаков и циклонов), другие — в магнитосфере и ионосфере в результате взаимодействия солнечного ветра с геомагнитным полем или проникают в магнитосферу и атмосферу из межпланетной среды, третьи генерируются источниками внутри Земли, в ее литосфере. При этом шумоподобная компонента электромагнитного излучения литосферного происхождения составляет заметную долю в общем балансе регистрируемого поля естественного происхождения. Заметим также, что в рассматриваемом диапазоне частот генерируются электромагнитные сигналы, связанные с индустриальной актив-

ностью или специальными экспериментами. Наблюдения свидетельствуют о том, что генерация электромагнитных возмущений в литосфере может происходить как спонтанно, т. е. вне прямой связи с проявлением сейсмичности, так и вынужденно, вследствие движения горных пород при сейсмическом воздействии [Гохберг и др., 1988; Левшенко, 1995; Atmosoheric …, 1999; Сурков, 2000; Gershenzon, Bambabidis, 2001; Светов, 2003; Гульельми, 2007; Макарец, Анахов, 2008].

Предложена схема классификации вынужденных сигналов [Левшенко, 1995] и проанализированы различные механизмы преобразования энергии движения горных пород в энергию электромагнитных возмущений, структуру сейсмомагнитного поля и методы регистрации сейсмомагнитных сигналов на фоне помех [Гульельми, 2007]. С учетом четырех механизмов генерации (индукционного, инерционного, деформационного и пьезомагнитного) получено достаточно общее линейное уравнение генерации вынужденных сигналов, учитывающее основные элементы механики горных пород — ускорения, деформации и напряжения [Гульельми, Левшенко, 1994; Левшенко, 1995; Гульельми, 2007].

Рассматривая геосреду в качестве пористого влагонасыщенного тела, обладающего магнитной структурой и находящегося в постоянном магнитном поле $\mathbf{H}_0$ (магнитном поле земного ядра), и привлекая дополнительную информацию о механоэлектромагнитных преобразованиях, уравнение генерации запишем в следующем виде:

$$D\mathbf{B}(r,t) = \nabla \times \mathbf{C}(\mathbf{r},t)\,, \qquad (1)$$

где

$$\mathbf{C} = -\alpha\mathbf{A} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}_0 + \beta\theta\mathbf{E}_0 + \nabla \times \mathbf{M}\,,$$

$$D = \frac{\partial}{\partial t} - \frac{c^2}{4\pi\sigma}\nabla^2\,,$$

$\mathbf{A} = \partial\mathbf{v} / \partial t$ — ускорение горных пород, $\mathbf{v}$ — скорость, α — коэффициент механомагнитной трансформации, σ — проводимость горных пород, $\mathbf{M}$ — магнитный момент единицы объема среды;

$$\beta = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \theta};\ M_i = \left(\gamma_i P_{11}\delta_{ij} + \gamma_2 P_{ij}\right) B_{0j},$$

P_{11} — давление в направлении, параллельном нагрузке; β, γ_1, γ_2 — параметры механомагнитной трансформации; $\mathbf{E}_0$, $\mathbf{B}_0$ — сторонние поля, однородно распределенные в пространстве и не зависящие от времени.

Уравнение (1) следует решать при заданном движении среды и заданных граничных условиях. Существенно, что в силу его линейности можно изучать различные механизмы генерации независимо друг от друга, складывая затем полученные результаты. Однако ценность такого решения для интерпретации данных наблюдений будет невелика до тех пор, пока не определены значения отмеченных феноменологических параметров среды распространения.

Что касается изучения спонтанных сигналов литосферного происхождения, то теоретические подходы к их анализу менее известны и довольно фрагментарны. Сложность и многоаспектность проблемы их генерации состоит в том, что пока не удается отразить имеющийся эмпирический и экспериментальный материалы на одинаковой разделяемой всеми специалистами аксиоматике [Богданов и др., 2009; Шуман, 2010а, 2012в; Шуман и др., 2012]. Очевидно, не существует и модели геосреды, одинаково пригодной для описания всего спектра и разнообразия регистрируемых излучений.

В столь сложной и неопределенной ситуации кажется более целесообразным и продуктивным классифицировать электромагнитные сигналы литосферного происхождения, опираясь на тип постулируемой модели геосреды.

Новые представления о геосреде как открытой нелинейной блочно-иерархической неравновесной системе стимулировали появление новых нетрадиционных подходов и возможностей в решении проблемы генерации электромагнитных сигналов этого типа [Шуман, 2010а; Шуман и др., 2012]. Очевидно также, что подходы, основанные на идеях нелинейной динамики, являются важными и перспективными направлениями дальнейших ис-

следований этих явлений. Ряд ключевых вопросов, относящихся к этой проблеме, рассмотрен в недавней работе [Шуман и др., 2012]. В настоящей статье сосредоточимся на одном из них, а именно, на феноменологическом описании механизмов генерации и распространения спонтанной компоненты электромагнитного шума литосферы, в частности на нелинейном уравнении генерации и некоторых его обобщениях.

О физических механизмах генерации спонтанного электромагнитного излучения (СЭМИ). Очевидно, трудности понимания, объяснения и описания явления спонтанной электромагнитной эмиссии литосферного происхождения прежде всего состоят в онтологической сложности самих исследуемых систем (геосреды) и в многофакторности действия физических полей на различные физически неоднородные и химически изменчивые среды. Как известно, геосреда — очень специфический объект исследований. Она непрерывно подвергается действию различных и разномасштабных внутренних и внешних сил. Геосреда — хороший пример открытой неравновесной диссипативной системы с множеством самоорганизующихся структур [Геншафт, 2009]. Самый мощный и постоянно действующий источник энергии в ней — тепловой поток, обусловленный процессами дегазации [Гуфельд, 2007; Геншафт, 2009; Гуфельд, Матвеева, 2011]. В ней существуют комплексы нелинейных взаимодействий между физическими полями, структурами и подсистемами, а энергетическая подпитка способствует формированию активных структур, характеризующихся нелинейной динамикой системы физических полей и автоволновыми механизмами переноса флюидов [Геншафт, 2009]. Как известно, такая система способна формировать различные пространственно-временные структуры активности, представляющие собой импульсы и фронты возбуждения, неустойчивость которых приводит к установлению в ней самоподдерживающихся колебаний с определенной пространственной конфигурацией. В этом контексте принципиальное значение имеет известная флуктуационно-диссипативная теорема статистической физики, смысл которой состоит в том, что механизм лю-

бой диссипации является одновременно и механизмом рождения флуктуаций [Кадомцев, 1994]. При этом возможна реализация различных механизмов и физического содержания процессов генерации флуктуаций геофизических полей на разных уровнях геометрически самоподобной блоковой системы геосреды, а протекающие в ней процессы имеют кооперативный (коллективный) характер.

Таким образом, флуктуации геофизических полей — это универсальный эффект, не требующий особых или специальных условий для своего образования. Они обусловлены только наличием диффузии и могут проявляться при генерации возмущений (волн) различной природы. При этом основной переменный фактор, определяющий и поддерживающий текущую нестабильность геосреды вблизи некоторого предельного уровня, — это восходящий поток легких газов [Гуфельд, 2007; Гуфельд, Матвеева, 2011; Gufeld et al., 2011]. Существенно, что энергия дегазации может быть переброшена вдоль шовных зон и глубинных разломов, быстро сконцентрирована и высвобождена со скоростью взрывной или даже детонирующей волны [Вол, Гилат, 2006].

Как известно, просачивание флюидов и газов из низов литосферы имеет диффузионную природу, и поэтому реализуются условия для возникновения фрактального геометрического шума. Важный аспект проблемы — учет фрактальной структуры геосреды. Можно без преувеличения сказать: если вещество не находится в газообразном или кристаллическом состоянии, то оно имеет в некотором диапазоне масштабов фрактальную структуру [Зосимов, Лямшев, 1995]. И хотя фрактальные свойства, казалось бы, и не относятся к основным параметрам объектов или процессов, наличие фрактальной структуры может в ряде случаев принципиально изменить их свойства. Суть дела — фрактальные системы, как правило, обладают более высокими удельными мощностями излучения и необычной (дробностепенной) зависимостью интенсивности излучения с расстоянием. Другая его сторона — это флуктуации излучения фрактальных структур. При этом решения уравнений электродина-

мики в таких средах отличаются исключительным разнообразием, множеством форм и особенностей [Болотов, 2002; Тарасов, 2009; Шуман, 2012б]. Стало очевидным, что вопрос о генерации и распространении СЭМИ носит фундаментальный характер и до настоящего времени нет общепринятой точки зрения по этим вопросам, хотя недостатка в гипотезах и предположениях, вообще говоря, тоже нет [Левшенко, 1995; Сурков, 2000; Gershenzon, Bambabidis 2001]. Поиски в его решении начали смещаться в области нелинейных динамических процессов и электродинамики с участием фрактальных структур [Шуман, 2010а, 2012б,в]. Попытаемся конкретизировать некоторые детали этих процессов.

Хорошо известно, что в геосреде существуют системы покоящихся и медленно движущихся зарядов, а также теллурических токов, создающих статические и изменяющиеся во времени электрические и магнитные поля. Известно также, что любое изменение параметров рассматриваемой системы (геосреды) во времени ведет к возбуждению и излучению электромагнитных возмущений. Иначе говоря, если в течение некоторого промежутка времени система электрических зарядов испытывает перестройку в результате изменения параметров системы, то в течение этой перестройки она излучает электромагнитные волны. Очевидно, такая перестройка может быть связана, например, с ударными волнами или распространяющимся фронтом самоорганизованной критичности. При этом, согласно работе [Гуфельд, Матвеева, 2011], основным переменным фактором, поддерживающим непрерывные изменения параметров геосреды, является восходящий поток легких газов (водород, гелий и др.). Прохождение восходящего потока легких газов непосредственно ведет к непрерывному изменению деформационных параметров горных пород на различных пространственных и временных масштабах. В итоге, можно говорить о режиме деформационных волн, распространяющихся в направлении потока легких газов.

Как известно, одна из моделей описания флуктуаций акустосейсмической эмиссии в процессе перестройки структуры

пород под влиянием этой волны связана с перколяционной моделью диффузионного фронта (фронтами переупаковки горных пород). Их структура может быть описана моделью перколяции в градиенте концентрации флюида [Зосимов, Лямшев, 1995, с. 399]. Напомним в этой связи, что теория протекания (перколяции) относится к области стохастической геометрии [Гийон и др., 1991]. Очевидно, с этими фронтами может быть связан всплеск диэлектрической проницаемости среды (в частности, за счет возмущений плотности горных пород), который, в свою очередь, при рассеивании на зарядах, сгустках зарядов или диполей, присутствующих в среде или появляющихся при распространении фронта, генерирует электромагнитное излучение — переходное рассеяние диссипативного всплеска диэлектрической проницаемости [Гинзбург, Цытович, 1984; Болотов, 2002]. Дальнейшая энергетическая и флюидная подпитка системы вызывает увеличение ее неравновесности и неустойчивости. Рост неустойчивости ведет к формированию флуктуаций, которые преобразуются в автоволны. Они взаимодействуют между собой, в результате чего в неоднородной среде образуется наиболее устойчивая и геометрически простая конфигурация со стоячими волнами. Термин «автоволны» подчеркивает тот факт, что их характеристики (форма, скорость распространения, пространственная мозаика) определяются параметрами среды и практически не зависят от начальных условий.

Таким образом, с экспериментальной точки зрения фронт самоорганизованной критичности, в качестве модели которого можно использовать, очевидно, фронты градиентной скалярной перколяции, является наиболее энергетически активным источником сейсмоакустического и спонтанного электромагнитного шума. В результате процессы их генерации оказываются тесно связанными между собой, а их противопоставление представляется безосновательным.

Уравнение генерации СЭМИ и его обобщения. Как следует из предыдущего изложения, весьма сложно и проблематично построить математическую модель геосреды и протекающих в ней процессов, которая была бы одновременно и реалистичной,

и поддающейся теоретическому анализу. Очевидно также, что описание процесса генерации и распространения СЭМИ в этих условиях в решающей степени зависит от понимания проблемы, выражающегося в выборе модели.

В последние годы стало ясно, что весьма широкий класс активных распределенных систем с диффузией, к которому относится и геосреда (открытая термодинамическая система, в которой диссипирует значительная часть энергии, поступающей из распределенного источника), может быть описан системой нелинейных уравнений диффузионного типа [Васильев и др., 1979; Кернер, Осипов, 1989; Фрадков, 2005]:

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = \sum_{j=1}^{N} \nabla(L_{ij} \nabla x_j) - g_i\left(x_1, ..., x_N, A\right), \qquad (2)$$

где x_i — функция пространственных переменных $r=D\subset R^n$ и времени t, определяющая состояние системы; L_{ij} — коэффициент диффузии; $\nabla(L_{ij}\nabla_{xj})$ — оператор, задающий диффузионный тип пространственного взаимодействия элементов системы; $g_i(x_1, \ldots, x_N, A)$ — источник, являющийся сильнонелинейной функцией величин x_i и A, но явно не зависящий от пространственных координат и времени; A — некая постоянная.

Граничные условия обычно задаются либо периодическими: $x_i(a, t)=x_i(b, t)$ при $D=[a, b]\subset R^1$, либо описывают отсутствие потока через границы:

$$\left(\frac{\partial x_i}{\partial r}\right)_{r=a} = \left(\frac{\partial x_i}{\partial r}\right)\Bigg|_{r=b} = 0.$$

Моделирование существенно усложняется, если в системе происходят направленные потоки компонент или имеются внешние переменные источники. Возрастающий интерес к рассматриваемому классу распределенных систем с диффузией прежде всего обусловлен тем, что в них реализуются яркие и типичные нелинейные явления. Это, во-первых, спонтанное образование автоструктур с мягким или жестким режимом возбуждения и, во-вторых, образование сложных автоволн и автосолитонов [Кернер, Осипов, 1989].

С учетом фундаментального характера рассматриваемых уравнений диффузионного типа и имеющегося опыта моделирования сейсмомагнитных волн (вынужденных ЛЭМС) [Гульельми, Левшенко, 1994; Левшенко, 1995; Гульельми, 2007] здесь предпринята попытка выписать линейное уравнение генерации СЭМИ в следующей достаточно общей форме [Шуман, 2008, 2010]:

$$\frac{\partial B_i}{\partial t} = \alpha_{ij}\nabla^2 B_j + F_i(\mathbf{B}), \qquad (3)$$

где $\alpha_{ij}=c^2/4\pi\sigma_{ij}$ — матрица диффузии; B_i — индукция; F_i (**B**) — сильнонелинейная функция, определяемая динамичностью процессов взаимодействия геосреды с восходящими потоками легких газов и экзотермических реакций и, в конечном счете, разнообразием и эффективностью механизмов механоэлектромагнитных преобразований.

Но, как свидетельствует имеющийся опыт описания активных сред, основные закономерности образования автоволновых структур могут быть воспроизведены уже в рамках двухтрехкомпонентной системы [Давыдов и др., 1991], которую с учетом (3) в простейшем случае можно записать так:

$$\frac{\partial B_i}{\partial t} = \alpha_{ij}\nabla^2 B_j + F_i(\mathbf{B},\mathbf{G}),$$

$$\frac{\partial G_i}{\partial t} = \beta_{ij} G_i + \varepsilon P_i(\mathbf{B},\mathbf{G}), \qquad (4)$$

где функция **G** определяет интенсивность динамических источников в геосреде (в частности, **G** — это градиент концентрации флюидной компоненты). При этом функция P_i (**B**, **G**), в принципе, может изменяться скачком в некоторый момент времени t, быть монотонной и даже линейной. Предельный случай, когда $\varepsilon=0$, соответствует однокомпонентной системе.

Уравнения (4) представляют собой достаточно сложную систему нелинейных уравнений в частных производных второго порядка.

Обзор возможных путей и методов ее решения, а также анализ некоторых особенностей этой системы приведен в статье [Цифра, Шуман, 2010]. С целью упрощения анализа системы (3) предлагается использовать ее симметрию. Симметричный метод позволяет свести это уравнение или систему (3) в частных производных параболического типа к изучению системы обыкновенных дифференциальных уравнений. С этой целью может быть использован как классический теоретико-групповой подход, так и его обобщение — метод условной инвариантности.

Однако, как правило, нелинейные уравнения или их системы имеют более чем один тип решений, и нахождение даже качественного решения может оказаться слишком сильным требованием. В этом случае для понимания проблемы принципиальное значение приобретают вычислительный эксперимент и полевые наблюдения.

Трудности описания существенно возрастают при попытке учета фрактальности модели геосреды. Они связаны как с проблемой выбора нелинейной функции $\mathbf{F}(\mathbf{B}, \mathbf{G})$ — функции источников, так и с определением оператора $\partial/\partial t - \alpha_{ij}\nabla^2$ в системах (3), (4). Как известно, в таких средах теряют смысл такие ключевые понятия, как эффективная электропроводность, диэлектрическая проницаемость, эффективный показатель преломления, упругие модули и т. п. Специфика проблемы — в зависимости этих макроскопических параметров от рассматриваемого объема, что делает невозможным применение стандартной модели сплошной среды, в которой они определяются однозначно для физически бесконечно малых объемов. В ряде случаев проблема описания фрактальных сред может быть решена введением макроскопических величин, зависящих от масштаба усреднения [Зосимов, Лямшев, 1995]. Однако исследование генерации, распространения и рассеивания электромагнитных возмущений во фрактальных средах в общем случае привели к появлению нового направления в электродинамической теории — фрактальной электродинамики, объединяющей фрактальную геометрию и электромагнетизм [Болотов, 2002; Боголюбов и др.,

2009; Тарасов, 2009; Шуман, 2012б]. Напомним в этой связи, что отказ от усреднения полей на физически бесконечно малых объемах приводит к существенной и неформальной перестройке всей схемы описания электромагнитных полей в материальной среде. С учетом этих обстоятельств попытаемся несколько модифицировать приведенные выше уравнения генерации спонтанной электромагнитной эмиссии (3), (4).

Как известно, с фрактальными свойствами сред и фрактальностью электродинамических структур связана физическая интерпретация дробных интегралов и производных [Нигматуллин, 1992; Болотов, 2002; Тарасов, 2009]. При этом дробное интегродифференциальное исчисление позволяет учесть эффекты пространственной и временной нелокальности в качестве единого математического формализма. Ограничимся частным примером, относящимся к динамике электромагнитного поля в диэлектрической среде с потерями [Тарасов, 2009].

Как свидетельствует эксперимент, для большинства материальных сред такого типа диэлектрическая восприимчивость в широкой области частот соответствует скорее дробно-степенному закону, называемому универсальным ответом (откликом), чем классическому дебаевскому [Тарасов, 2009]. В частности, эта закономерность экспериментально установлена для биполярных сред вне области частот максимальных потерь в средах, поляризация которых является результатом перемещений ионных или электронных носителей зарядов.

Согласно работе [Тарасов, 2009], для относительно низких частот, когда $\omega << \omega_p$, где ω_p — частота максимальных потерь, соответствующий универсальный дробно-степенной закон может быть представлен в виде

$$\chi(\omega) = \chi(0) - \chi_p (iw)^b ,$$

$$v < b < 1 ,$$

с некоторыми положительными константами $\chi(v)$, χ^{β}, β, подлежащими экспериментальному определению.

Далее, используя уравнение Максвелла, В. Е. Тарасов приходит к следующему дробному дифференциальному уравнению

для индукции магнитного поля, демонстрирующему степенной закон релаксации [Тарасов, 2009]:

$$\frac{1}{v_\beta^2}\frac{\partial^2 \mathbf{B}(t_i,r)}{\partial t^2} - \frac{a_\beta}{v_\beta^2}\left({}_0D_t^{2+\beta}\mathbf{B}\right)(t,r) - \nabla^2\mathbf{B}(t,r) = \mu \mathrm{rot}\mathbf{j}(t,r), \qquad (5)$$

где поток плотности электрического тока свободных зарядов рассматривается в качестве внешнего источника,

$$v_\beta^2 = \frac{1}{\varepsilon_0\mu\left[1+\tilde{\chi}(0)\right]},\ a_\beta = \frac{\chi_p}{1+\tilde{\chi}(0)},$$

${}_0D_t^{2+\beta}$ — дробная производная Римана—Лиувилля на полуоси [0, ∞). Существенно, что решение уравнения (5) свидетельствует о дробно-степенном затухании магнитного поля в диэлектрических средах с потерями. С учетом этого результата можно вернуться к уравнению генерации спонтанной электромагнитной эмиссии, переписав его в следующей достаточно общей форме:

$$\frac{1}{v_\beta^2}\frac{\partial^2 \mathbf{B}(r,t)}{\partial t^2} - \frac{a_\beta}{v_\beta^2}\left({}_0D_t^{2+\beta}\mathbf{B}\right)(t,r) - \nabla^2\mathbf{B}(t,r) = \mathbf{F}(\mathbf{B},\mathbf{G}), \qquad (6)$$

где $0<\beta<1$.

Можно, очевидно, предложить и другой способ обобщения уравнения генерации (3), опираясь на теорию физических систем с потерями, которые могут быть описаны уравнениями в дробных производных. В частности, с этой целью можно воспользоваться «сверхмедленным» уравнением диффузии для основного проводящего канала [Нигматуллин, 1992]:

$$\frac{\partial^\alpha_{0t}U}{\partial t^\alpha} = D_\alpha \frac{\partial^2 U}{\partial r^2},\ 0<\alpha<1. \qquad (7)$$

В этом случае функция U изменяется медленнее первой производной. Сама структура каналов порождается фрактальной структурой среды (пористой системы). При этом регуляризованная дробная производная определяется с помощью равенства

$$\partial_{0t}^{\alpha} y(t) = \operatorname{sign}^{n}(t-s) D_{st}^{\alpha-n} \frac{\partial^{n} y(t)}{\partial t^{n}},$$

$$n-1 < \alpha \le n, \tag{8}$$

а оператор D_{st}^{α} с началом в точке s — соотношениями

$$D_{st}^{\alpha} y(t) = \begin{cases} \dfrac{\operatorname{sign}(t-s)}{\Gamma(-\alpha)} \displaystyle\int_{s}^{t} \frac{y(t')\,dt'}{(t-t')^{\alpha+1}}, \alpha < 0, \\ y(t), \alpha = 0, \\ \operatorname{sign}^{n}(t-s) \dfrac{d^{n}}{dt^{n}} D_{st}^{\alpha-n} y(t), n-1 < \alpha \le n. \end{cases}$$

В итоге в случае однородной среды с фрактальной структурой уравнение генерации (3) примет следующий вид:

$$\partial_{0t}^{\alpha} \mathbf{B} - Q_{\alpha} \nabla^{2} \mathbf{B} = \mathbf{F}(\mathbf{B}, \mathbf{G}). \tag{9}$$

К сожалению, однако, в этом случае помимо отмеченных ранее проблем с определением функции источника **F** возникают дополнительные, связанные с заданием коэффициента диффузии Q_{α} согласованного с фрактальной структурой геосреды.

Заключение. Теория и обширный полевой эксперимент свидетельствуют о реальном существовании спонтанной электромагнитной эмиссии литосферного происхождения, генерируемой в широком диапазоне частот и обладающей упорядоченной структурой, тесно связанной со строением и динамикой геосреды — активной диссипативной системы. При этом достаточно располагать источником энергии, чтобы самовозбуждение колебаний стало возможным. И здесь отчетливо проявляются свойства реальной геосреды, а не лабораторного образца. Фрактальные модели качественно изменяют подходы к описанию этих явлений и дают, быть может, самое естественное их описание. В то же время классические представления о генерации спонтанного электромагнитного шума все еще существенно опираются на модели сплошной среды и используют математический аппарат, оперирующий, главным образом, с гладкими

функциями пространства и времени. В частности, классические представления к ее описанию физически сводятся к решению задач математической физики, описываемых системой уравнений Максвелла, когда электромагнитные параметры среды — проводимость σ, диэлектрическая ε и магнитная μ проницаемости — являются константами, независимыми от координат и времени (уравнение генерации Гульельми—Левшенко; оптимизационная модель Гершензона—Бамбакидиса и др.). Однако представление о геосреде как открытой неравновесной диссипативной системе с множеством самоорганизующихся структур лишает нас такой возможности. Очевидно, электродинамика такой самоорганизующейся блочно-иерархической структуры оказывается тесно связанной с ее механикой, флюидодинамикой и термодинамикой. Следует учитывать также возможность различного физического содержания процессов генерации излучений различной природы на различных уровнях самоподобной блоковой системы.

Понятно, что при объяснении всей совокупности эмиссий литосферного происхождения необходимо привлечение различных механизмов их генерации с учетом флуктационно-диссипативной теоремы, а новые представления о геосреде требуют пересмотра математических моделей ее описания. И хотя разграничивать или как-то противопоставлять сейсмоакустический и электромагнитный шумы литосферы как универсального свойства реальной геосреды представляется сомнительным, здесь была сделана попытка все же вычленить его электромагнитную компоненту, предложить нелинейное уравнение генерации и рассмотреть возможности его обобщения. В итоге проблематика в этой области исследований обогатилась новыми задачами, требующими нетрадиционных подходов к их решению, а некоторые старые, которые еще недавно представлялись как трудноразрешимые, получили новое видение. Тем не менее появляются и новые проблемы. Здесь весьма вероятно столкновение с той необычной или нестандартной ситуацией, когда исходный математический аппарат очерчен, но по ряду объективных причин не вполне можно представить, как им воспользо-

ваться. И в этом смысле целенаправленный полевой эксперимент приобретает, быть может, решающее значение. Однако, несмотря на трудности теоретического описания спонтанного электромагнитного шума литосферы, изучение этого явления дает уникальные возможности получения информации об электродинамических свойствах геосреды, ее состоянии и электродинамике. В качестве примера здесь можно указать на появление нового метода геофизической разведки — метода анализа спонтанной электромагнитной эмиссии Земли, становление которого происходит в настоящее время [Шуман и др., 2012].

Электродинамика и отклик геосреды на воздействие внешних электромагнитных полей

Геофизический журнал,
№ 5, Т. 35, 2013, С. 129—149.

Введение. Вопросы электродинамического описания геосреды, его роль и значение для конструирования зондирующих систем и методики их практического применения имеют сравнительно давнюю историю и весьма обширную литературу (см., например, [Светов, 2008; Шуман, 2010в, 2012б,в; Шуман, Савин, 2011]). Классический подход (парадигма пассивного континуума): электромагнитные явления обычно выражаются и трактуются на основе «языка» усредненных характеристик сплошной среды (удельная электропроводность, диэлектрическая и магнитная проницаемости) и сплошного усредненного поля. Разумеется, в определенном масштабе геосреда (геоматериал) может и должна рассматриваться конструктивно в рамках модели континуума и концепции эффективной гомогенизации. В рамках такого подхода можно рационально ввести определение ее физических параметров, в том числе и электромагнитных. Однако при исчерпывающем описании реальных объектов в земной коре проблема может оказаться весьма сложной. В частности, сегодня существует достаточно ве-

сомых оснований и новых задач, свидетельствующих о том, что среда не может больше рассматриваться в качестве континуума — ей оказалась присуща самоподобная структура. В этом случае континуальные модели должны выступать частным случаем моделей со структурой. Следует также учитывать возможности различного физического содержания электромагнитных процессов на разных уровнях геометрически самоподобной структуры (блоковой системы). В результате не удается отразить имеющуюся эмпирику на одинаково разделяемой всеми аксиоматике. В итоге явно ощущается недостаточность традиционных геоэлектрических моделей, касающихся геосреды, хотя, как известно, сама по себе теория электромагнитных процессов в ней и ее электродинамическое описание богаты глубокими результатами и развитым теоретическим аппаратом. В частности, стало очевидным, что достаточно подробное описание процессов генерации и распространения электромагнитных возмущений, их взаимодействия со средой, физических основ электромагнитного воздействия на процесс разрушения геоматериалов земной коры невозможно или сильно ограничено формулами, полученными на основе представлений об электромагнитном отклике в пространстве целочисленной меры и гладких функций.

Идеи об активной роли геосреды как открытой нелинейной системы с множеством самоорганизующихся структур позволяют по-новому подойти к этим проблемам. Методы и принципы нелинейной динамики являются важным и эффективным направлением ее исследований. Неравновесность, нелинейность, неустойчивость, реальная структура геосреды — вот те основные положения, которые, по нашему мнению, являются ключевыми при рассмотрении упомянутых задач.

Очевидно, новые представления о геосреде требуют пересмотра математических, в том числе электродинамических моделей ее описания. С этой точки зрения применение в геоэлектрике идей масштабной инвариантности (скейлинга) и разделов математического анализа, связанных с теорией множеств, дробной размеренности, теории динамических систем откры-

вает дополнительные возможности и перспективы развития электромагнитных зондирующих систем, а фракталы, быть может, дают самые естественные подходы к описанию ее электродинамических свойств. Ясно также, что электродинамика такой самоподобной самоорганизующейся структуры (геосреды) оказывается тесно связанной с ее механикой, флюидодинамикой и термодинамикой. Однако отказ от усреднения полей и свойств на физически бесконечно малых объемах приводит к существенной и неформальной перестройке всей схемы описания электромагнитных полей в материальной среде, а введение дробной меры и скейлинговых инвариантов вызывает необходимость работы преимущественно со степенными фрактальными распределениями [Зосимов, Лямшев, 1995; Болотов, 2002; Тарасов, 2009; Шуман, 2012б]. Очевидно, весьма сложно и проблематично построить или представить себе модель геосреды, одинаково пригодную для описания всего спектра колебаний, распространяющихся или генерируемых в ней, хотя в разное время и появлялось несколько вселяющих энтузиазм моделей [Лукк и др., 1996; Шуман, 2010в, 2012а; Шуман, Савин, 2011]. Нетрудно понять, что степень обоснованности такой точки зрения весьма высока.

Ниже попытаемся дать по возможности краткий обзор результатов, полученных различными авторами в этой области исследований, сформулировать некоторые актуальные проблемы современной геоэлектродинамики и обсудить возможные подходы к их решению. К их числу могут быть отнесены вопросы исследования реакции геосреды на внешние энерговоздействия, в частности ее облучение мощными электромагнитными импульсами, определения плотности диссипируемой энергии, балансных уравнений для энергии и импульса, теории электромагнитных полей в диэлектрических средах, диэлектрическая восприимчивость которых подчиняется дробно-степенному закону в широкой области частот, некоторых положений нетеплового действия электромагнитных полей на материальные среды. Разумеется, ввиду многоаспектности отмеченных проблем нас будет интересовать только их принципиальные, клю-

чевые элементы, которые до настоящего времени все еще продолжают оставаться предметом дискуссий и обсуждений [Давидович, 2010; Сидоренков, 2007]. Очевидно, к их числу могут быть также отнесены электромагнитно-акустические и акустоэлектромагнитные преобразования в скин-слое источника поля [Каганов, Васильев, 1993; Шуман, 2012г], физические механизмы генерации и распространения электромагнитных сигналов литосферного происхождения [Гульельми, 2007; Шуман, 2012б,в]. Элементам анализа физической стороны этих вопросов, все еще остающихся уязвимыми для критики со стороны многих профессионалов и зачастую остающихся, так сказать, «за кадром», и посвятим дальнейшее изложение.

Конечно, трудности понимания и истолкования состоят, прежде всего, в сложности исследуемых систем и в многофакторности действия физических полей на неоднородные и изменчивые среды.

Геосреда: некоторые свойства и модели. Говоря об электромагнитном отклике геосреды на внешние энергетические воздействия, прежде всего необходимо учитывать ее свойства, имеющие ключевое значение для понимания физических процессов и механизмов, до сих пор остающихся недостаточно осмысленными или известными.

Как результат обобщения многолетних экспериментальных исследований физических свойств горных пород в их исключительно широком петрографическом и фациальном разнообразии, физических характеристик и термодинамических условий в 80-х годах прошлого века произошел перелом в понимании определяющих свойств геосреды как открытой неравновесной диссипативной динамической системы, нелинейной, активной, энергетически насыщенной, с непрерывно изменяющимися параметрами. В ней постоянно идут необратимые диссипативные процессы (диффузия, химические реакции, фазовые переходы), существуют комплексы нелинейных взаимодействий между физическими полями, структурами и подсистемами [Садовский и др., 1987; Николаев, 2002; Садовский, 2004; Гуфельд, 2007, 2013; Геншафт, 2009]. При этом сама геосистема является

иерархией подсистем. Протекающие в ней процессы имеют кооперативный (коллективный) характер, а «мотором» всей геодинамики является тепловой поток из земных недр, обусловленный и диффузией легких газов (водород, гелий).

Появление колебательных движений — одна из форм диссипации энергии. Спектр колебаний характеризует меру энергонасыщенности геосистемы.

Как было показано во многих работах, диссипативные твердотельные структуры, самоорганизующиеся в открытых системах рассматриваемого типа (пятна самоорганизации), фрактальны. Фрактальная структура и «шум мерцания» являются соответственно «пространственными и временными срезами», «отпечатками» самоорганизованной критичности [Бак, Чен, 1991]. Как известно, один из наиболее содержательных подходов к фрактальному анализу процессов опирается на предположение о том, что процесс порождается динамической системой конечной размерности с хаотическим поведением [Зосимов, Лямшев, 1995]. Понятие фрактала тесно связано с хаосом в динамической системе, причем образ хаоса в фазовом пространстве системы — странный аттрактор — представляет собой фрактал. Фрактальные системы, как правило, обладают более высокими удельными излучательными параметрами, чем континуальные среды, при этом обратные степенные законы в спектре излучений связаны с фрактальными свойствами реальных систем. Ключевая роль здесь принадлежит флуктуационно-диссипативной теореме статфизики, связывающей спонтанные флуктуации параметров системы с ее диссипативными свойствами [Ильинский, Келдыш, 1989; Кадомцев, 1994].

Как известно [Кадомцев, 1994; Фрадков, 2005], у открытых систем с диссипацией фазовое пространство можно упрощенно представить разделенным на области притяжения к различным аттракторам. Далее, что существенно, в сложных открытых физических системах могут проявляться тенденции к их дифференциации, расслоения на информационные и динамические подсистемы, причем информационные аспекты их поведения и развития выходят на первый план, в то время как динамика

создает лишь основу для информационного развития [Кадомцев, 1994, с. 524]. В частности, те структурные элементы, которые могут сильно влиять на динамику и поведение системы относительно малыми возмущениями (сигналами), предпочтительно выделить в структуру управления. Такие системы принято называть системами с информационным поведением [Кадомцев, 1994]. Очевидно, это является как раз тем принципиальным моментом, которым следует дополнить имеющиеся модельные представления о геосреде как активной нелинейной динамической системе. В этом случае, как известно, для информационного поведения систем такого рода наиболее важной является структурная сложность и структурная иерархия, чем иерархия элементарных уровней. При этом благодаря бифуркации динамических переменных вблизи точек ветвления в геосреде появляется возможность ее свободного развития, реализующего в структурном усложнении и развитии ее составных элементов и структур. В конечном итоге динамическое поведение геосреды и ее развитие существенно начинают определяться ее информационной, управляющей компонентой, включая и информационное отношение к внешнему миру.

Новые постановки задач потребовали введения новых понятий (индекс возбудимости и др.) и привели к описанию новых эффектов (резонанс с обратной связью, возникающий при подаче внешнего возмущения, меняющего свой характер втечение процесса). Кроме того, идеи о самоорганизации и образовании диссипативных структур в открытых системах оказались очень плодотворными, чтобы перебросить мост между физикой, геофизикой и геологией [Климонтович, 1999]. Такой подход, в частности, дает ключ к объединению таких эффектов, как виброиндуцированный резонанс, стохастический резонанс, шумоиндуцированные переходы, синхронизация под действием внешних сил (авторезонанс) [Фрадков, 2005, с. 118]. На смену однозначности приходит множество путей развития системы, поведения ее объектов, а ограниченная точность в описании системы имеет принципиальное значение.

Примечательно, что с физической точки зрения важны, в первую очередь, грубые, существенные свойства системы, сохраняющиеся при малых возмущениях и, следовательно, являющихся наблюдаемыми [Лоскутов, 2010]. Слабый хаос стабилизирует колебательные процессы. Отклик нелинейной системы на слабое внешнее воздействие усиливается с ростом интенсивности шума в ней. Слабый шум не оказывает ощутимого влияния на поведение системы, пока параметры далеки от точки бифуркации.

Заметим далее, что методы анализа поведения сложных динамических систем, к числу которых относится и геосреда, разработанные в последнее годы в области нелинейной динамики, позволяют, в частности, различать системы с разным типом устойчивости и в общих чертах прогнозировать ее состояние при внешних воздействиях [Кляцкин, 2009; Турунтаев и др., 2012]. Другой аспект проблемы — нарастание мягких (низкочастотных) мод (пульсаций) в условиях близости параметров системы к точке бифуркаций стационарного режима — является универсальным [Руманов, 2013]. Иначе говоря, судить о приближении к бифуркации рассматриваемой системы можно заранее по нарастанию низкочастотных колебаний в спектре ее шумов (сейсмоакустических, электромагнитных и др.).

Таким образом, весьма трудно построить физико-математическую модель геосреды и происходящих в ней процессов, которая была бы одновременно и реалистичной, и поддающейся теоретическому анализу. Очевидно также, что понимание упомянутых проблем и процессов, а также реализация понимания требует времени и усилий.

О моделировании взаимодействия электромагнитного поля с материальной средой. Начнем с описания электромагнитных явлений, которые могут быть выражены на основе усредненных характеристик сплошной среды и сплошного усредненного поля. Как известно [Ландау, Лифшиц, 1959; Бредов и др., 1985; Ильинский, Келдыш, 1989], при описании процесса взаимодействия электромагнитного поля с материальной средой исходной является система уравнений Максвелла, которая

может быть получена непосредственно после усреднения по статистическому ансамблю микроскопических уравнений Максвелла, справедливых всегда, когда справедлива сама классическая теория поля. Заметим в этой связи, что любая осмысленная физическая теория может и должна оперировать лишь с усредненными по флуктуациям значениями полей и их корреляций в различных пространственно-временных точках или же с распределением вероятностей для их различных конфигураций.

Известно, что макроскопические уравнения Максвелла в среде могут быть записаны в разных формах. В первую очередь, это обусловлено способом определения индуцированных в среде токов. В частности, если ввести в рассмотрение полную электрическую индукцию

$$\mathbf{D}(\mathbf{r},t) = \mathbf{E}(\mathbf{r},t) + 4\pi\mathbf{P}(\mathbf{r},t)\,,$$

которая учитывает все эффекты движения зарядов и токи намагничения, а поляризация $\mathbf{P}(\mathbf{r},t) = \int\limits_{-\infty}^{t} \mathbf{j}(\mathbf{r},t)dt$ включает в себя весь индуцированный ток без разделения на отдельные компоненты, приходим к системе уравнений Максвелла в среде, записанной в форме Ландау—Лифшица (ЛЛ-форма), связывающих между собой три поля **D**, **E** и **B**:

$$\mathrm{rot}\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = -\frac{1}{c}\frac{\partial\mathbf{B}(\mathbf{r},t)}{\partial t}\,,\ \mathrm{rot}\mathbf{B}(\mathbf{r},t) = \frac{1}{c}\frac{\partial\mathbf{D}(\mathbf{r},t)}{\partial t} + \frac{4\pi}{c}\mathbf{j}_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r},t)\,,$$

$$\mathrm{div}\mathbf{B}(\mathbf{r},t) = 0\,,\ \mathrm{div}\mathbf{D}(\mathbf{r},t) = 4\pi\rho_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r},t)\,. \qquad (1)$$

Здесь введены сторонние токи $\mathbf{j}_{\mathrm{ext}}(r, t)$ и заряды $\rho_{\mathrm{ext}}(r, t)$, связанные уравнением непрерывности. Система (1) неполная и для ее замыкания необходимо ввести материальные уравнения, связывающие **P** или **D** с **E**. В общем случае эти связи носят нелокальный характер.

Для гармонического во времени поля (зависящего от времени как $e^{-i\omega t}$) общая форма линейного материального уравнения, как известно, имеет вид

$$D_i^{\Lambda\Lambda}(\omega,\mathbf{r}) = \int \varepsilon_{ij}^{\Lambda\Lambda}(\mathbf{r},\mathbf{r}',\omega)E_j(\mathbf{r},\mathbf{r}',\omega)dv' .$$

В случае трансляционно-инвариантной бесконечной среды вводится тензор диэлектрической проницаемости, зависящий от частоты ω и волнового вектора **k**:

$$\varepsilon_{ij}^{\Lambda\Lambda}(\mathbf{k},\omega) = \int_0^\infty dr \int d(\mathbf{r}-\mathbf{r}') \times \left\{ \varepsilon_{ij}^{\Lambda\Lambda}\left(\mathbf{r}-\mathbf{r}', \tau e^{-i\omega t - i\mathbf{k}(\mathbf{r}-\mathbf{r}')}\right)\right\} .$$

Зависимость $\varepsilon_{ij}^{\Lambda\Lambda}$ от **k** и дала эффектам, связанным с нелокальностью материальных уравнений, название пространственной дисперсии.

Существенный аспект проблемы — форма записи уравнений Максвелла, предложенная Ландау—Лифшицем для описания сред с пространственной дисперсией в случае наличия границы раздела — требует введения дополнительного материального уравнения для поверхностного тока, причем это уравнение не является дополнительным граничным условием, а выступает в качестве замены обычных максвелловских условий непрерывности тангенциальных составляющих полей [Агранович, Гинзбург, 1979; Виноградов, 2002]. В итоге обнаруживается два различных физических явления: появление тока поляризации **j** и связанного заряда ρ в однородной толще материальной среды и поверхностного тока поляризации **i** и поверхностной плотности связанных зарядов $\sigma_{пов}$, возникающих вблизи границы раздела сред. Это указывает на необходимость введения двух материальных уравнений: одного для обобщенной индукции **D** в толще среды, а другого для поверхностного тока поляризации [Агранович, Гинзбург, 1979].

В рамках принятого феноменологического подхода описания эти дополнительные условия должны линейным образом связывать между собой векторы $\mathbf{E}_\tau$ и $\mathbf{D}_\tau^{\Lambda\Lambda}$ на границе раздела, т. е. можно записать

$$D_\tau^{\Lambda\Lambda}(0) + f_{ij}E_j(0) = 0 ,$$

где f_{ij} — некоторый тензор. Аргумент у $D_\tau^{\Lambda\Lambda}(0)$ и $E_j(0)$ указывает на то, что значения полей берутся на границе раздела.

Согласно работе [Агранович, Гинзбург, 1979], установление связи между материальными тензорами, характеризующими индукцию в толще среды и приповерхностную неоднородность диэлектрической проницаемости, является одной из важнейших задач электродинамики материальных сред.

Обратим внимание на важное обстоятельство — максвелловские граничные условия не являются следствием интегральной формы уравнений Максвелла. В то же время использование каких-либо граничных условий означает, что тем самым определяется метод измерения полей внутри среды, а заодно и физический смысл полей **E** и **B** [Виноградов, 2002].

Если же удобнее и целесообразнее разделить наведенные токи на ток свободных носителей, ток поляризации связанных зарядов и вихревой ток намагничения, то обычно вводятся другие по смыслу векторы электрической индукции $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)=\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)+4\pi\mathbf{P}(\mathbf{r}, t)$ и напряженности магнитного поля $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)=\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)+4\pi\mathbf{M}(\mathbf{r}, t)$. При этом в поляризации среды $\mathbf{P}(\mathbf{r}, t)$ можно учесть вклад токов свободных и связанных носителей заряда. Тогда вектор намагниченности среды $\mathbf{M}(\mathbf{r}, t)$ будет определять вихревые токи. В итоге система уравнений Максвелла в среде будет выглядеть следующим образом (форма Казимира или K-форма):

$$\mathrm{rot}\mathbf{E}(\mathbf{r},t)=-\frac{1}{c}\frac{\partial\mathbf{B}(\mathbf{r},t)}{\partial t},\ \mathrm{rot}\mathbf{H}(\mathbf{r},t)=\frac{1}{c}\frac{\partial\mathbf{D}(\mathbf{r},t)}{\partial t}+\frac{4\pi}{c}\mathbf{j}_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r},t),$$

$$\mathrm{div}\mathbf{D}(\mathbf{r},t)=4\pi\rho_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r},t),\ \mathrm{div}\mathbf{B}(\mathbf{r},t)=0. \qquad (2)$$

В отличие от системы (1), эта система содержит четыре вектора: **E**, **D**, **H** и **B**. В итоге она также оказывается незамкнутой и ее необходимо дополнить уравнениями, устанавливающими дополнительные связи между векторами. В общем случае материальные уравнения представляют собой интегральные операторы по пространству и времени (в фурье-компонентах — функции круговой частоты и волнового вектора **k**; в этом случае это комплексные феноменологические параметры). Для стандартной модели сплошной среды они однозначно определяются

для физически бесконечно малых объемов и не зависят от рассматриваемого объема.

Приведенные соотношения и являются фундаментом классической электродинамики материальных сред, которая, в свою очередь, составляет теоретическую основу большинства методов геоэлектрики.

Разумеется, обе формулы (1) и (2), должны давать эквивалентное описание электромагнитных явлений. При этом граничные условия и материальные уравнения должны быть сформулированы в соответствии с конкретными особенностями задачи и моделью среды [Бредов и др., 1985; Виноградов, 2002]. Однако некоторые авторы рассматривают К-форму (2) как наиболее общую, обосновывая такую точку зрения тем обстоятельством, что К-форма записи уравнений Максвелла инвариантна относительно преобразования Сердюкова—Федорова [Виноградов, 2002]. ЛЛ-форма не обладает таким свойством.

Напомним, что использование К-формы материальных уравнений возможно, если в элементарном объеме усреднения индуцированный в нем ток можно разделить на средний, вихревой и седловинный. Тогда с учетом того факта, что любое векторное поле может быть представлено в форме [Виноградов, 2002]

$$J_i = ce_{ijk}\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{1}{2c}e_{kln}x_e J_n\right) + \frac{\partial}{\partial x_k}\left[\frac{1}{2}(x_i J_k + x_k J_i) - x_i\frac{\partial}{\partial x_k}J_k\right],$$

индуцированный макроскопический ток **J** запишется в виде

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} - \left[\nabla \cdot \frac{\partial Q}{\partial t}\right] + c\left[\nabla \times \mathbf{M}\right], \qquad (3)$$

где **P**, Q — макроскопические плотности электрического и электрического квадрупольного моментов, **M** — макроскопическая плотность магнитного дипольного момента. При этом ток поляризации $\partial\mathbf{P}/\partial t$ равен среднему от индуцированного в элементе объема тока, ток намагничения $c\left[\nabla \times \mathbf{M}\right]$ включает в себя все микроскопические токи, замыкающиеся в объема усреднения,

а квадрупольная часть тока $\left[\nabla \cdot \frac{\partial Q}{\partial t}\right]$ включает оставшуюся часть индуцированных токов. Эти величины (**P**, Q и **M**) определяются по стандартным формулам для электрического дипольного, электрического квадрупольного и магнитного дипольного моментов относительно центра объема на каждом масштабе усреднения [Джексон, 1965; Виноградов, 2002].

Способ определения полей при этом связан с определением граничных условий: предположив, что максвелловские граничные условия выполняются, получим метод измерения всех полей. Справедливость самих максвелловских граничных условий может быть доказана только экспериментально или микроскопической теорией, описывающей структуру переходного (граничного) слоя. Обратная процедура — постулирование физического смысла полей, входящих в уравнения, а затем вывод граничных условий — весьма проблематична [Виноградов, 2002].

Далее, вводя магнитное поле **H** и магнитную проницаемость μ:

$$\mathbf{H} = \mathbf{B} - 4\pi\mathbf{M}\,,\ \mathbf{B} = \mu\mathbf{H}\,,$$

а также электрическое смещение

$$\mathbf{D}_k = \mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P} - 4\pi\left[\nabla Q\right]\,, \qquad (4)$$

в конечном счете и получаем уравнения Максвелла в форме Казимира [Джексон, 1965; Виноградов, 2002].

Заметим, что в рамках формы Казимира соотношение между макроскопическими плотностями моментов и макроскопическими полями также в общем случае может быть нелокальным.

Таким образом, как следует из уравнения (4), при достаточно сложной молекулярной структуре вещества его свойства не всегда можно достаточно полно описать, рассматривая лишь распределения зарядов, токов, а также электрические и магнитные дипольные моменты. В некоторых случаях, вообще говоря, необходимо также рассматривать распределение квадруполей, состоящих, как известно, из двух близкорасположенных и антипараллельных электрических или магнитных дипольных

моментов. Но, к счастью, для подавляющего большинства задач радиофизики и геоэлектрики, связанных с размещением антенн в поглощающей среде или над нею, учет лишь дипольных моментов дает хорошее приближение [Кинг, Смит, 1984]. В итоге математическая модель среды, представляющая только суперпозицию положительных и отрицательных зарядов электрических и магнитных дипольных моментов, оказывается весьма эффективной.

Приведенные соотношения дают достаточно общую картину процессов взаимодействия среды и поля. Однако в последние годы возрастает интерес к некоторым частным его проявлением и вопросам, нуждающимся в более углубленном и детальном рассмотрении или конкретизации. В частности, применительно к геосреде имеются весомые предпосылки рассматривать ее в виде некоторого фонового скелета, обладающего диэлектрическими и проводящими свойствами и плазмоподобного включения, состоящего из многочастичной электронно-ионной фракции (или жидкости), находящейся в подмагничивающем поле H_0 земного ядра. В ней одновременно присутствуют и свободно движущиеся заряды, и связанные заряды, совершающие колебательные и вращательные движения [Шуман, Савин, 2011].

Как известно, наиболее общим при изучении процесса взаимодействия электромагнитного излучения и плазмоподобных образований, включая и среды с плазменным компонентом, является метод кинетического уравнения, использующий функцию пространственно-временного распределения частиц [Бредов и др., 1985]. В этом случае явление скин-эффекта, составляющее физическую основу электромагнитных зондирующих систем, может быть сформулировано (по крайней мере, в некотором диапазоне частот) как отклик электронно-ионного газа в фоновой среде на внешнее переменное электромагнитное поле. Заметим также, что в последнее время распространение электромагнитных волн в плазме и средах с плазменным компонентом обычно изучается с помощью другого подхода, основанного на использовании комплексной диэлектрической

проницаемости. Однако в этом случае для получения явного выражения для тензора диэлектрической проницаемости необходимо определить движение электронов, ионов и нейтральных молекул плазмы в переменном электрическом и подмагничивающем H_0 полях. Исходными уравнениями, как и в упомянутом случае, являются уравнения Максвелла и кинетические уравнения для электронов, ионов и молекул [Бредов и др., 1985]. К сожалению, однако, проблема интегрирования уравнений движения при этом может быть решена явно лишь в некоторых частных, исключительных, случаях.

Кратко коснемся теперь вопросов электродинамики фрактальных сред. Как известно, в ее основе лежит фундаментальное понятие фрактала или мультифрактала. К фрактальным структурам, как уже упоминалось, обычно относятся фрактальные кластеры поверхности, перколяционные кластеры и другие образования, наблюдаемые в эксперименте [Болотов, 2002]. Предложено несколько подходов к построению ее математического аппарата. В частности, в одном из них вводится в рассмотрение дробное интегродифференцирование [Нигматуллин, 1992; Потапов, 2009]. Другой опирается на структуру множества Кантора и пространства с дробной размерностью Хаусдорфа—Безиковича и используется аппарат обобщенных функций [Болотов, 2002].

Трудности электродинамического описания фрактальных сред обусловлены, прежде всего, зависимостью их макроскопических параметров от рассматриваемого объема усреднения, что делает невозможным применение стандартных методик и моделей. Кроме того, собственно определение хаусдорфовой размеренности, требующее предельного перехода к бесконечно малым объемам, невозможно использовать в физических измерениях [Зосимов, Лямшев, 1995]. Поэтому содержательное с точки зрения физики определение фрактала включает свойство самоподобия (скейлинга). Проблема описания таких сред решается тогда введением макроскопических величин, зависящих от масштаба усреднения [Зосимов, Лямшев, 1995]. Однако в связи с необходимостью усреднения по «физически бесконечно ма-

лым» фрактальным элементам объема последовательное определение диэлектрической и магнитной проницаемостей подразумевает однозначное разбиение индуцированного в среде тока на части, одна из которых ответственна за электрическую, а другая — за магнитную [Бредов и др., 1985; Виноградов, 2002].

Но здесь можно столкнуться с ситуацией, когда ток в некоторой точке среды может давать вклад в электрическую поляризацию на одном масштабе усреднения и в намагничение в другом [Виноградов, 2002]. Измерения ε, μ и σ, проводимые с фрагментами фрактальной структуры разного размера, дадут разные результаты. В этом смысле вопрос о многообразии материальных уравнений для сред с фрактальной структурой в значительной степени остается открытым. Тем не менее к настоящему времени в рамках электродинамики фрактальных сред получен ряд фундаментальных результатов. Решение уравнений электродинамики в таких средах, как оказалось, отличается исключительным разнообразием, множеством форм и особенностей [Болотов, 2002; Боголюбов и др., 2009; Потапов, 2009; Тарасов, 2011]. В частности, получен новый тип уравнений, описывающих поведение электромагнитных полей во фрактальных средах, получивших название диффузионно-волновых с изменяющимся типом. В качестве другого примера можно указать на анализ переходного рассеяния диссипативного всплеска диэлектрической проницаемости при его падении на покоящиеся заряды, сгустки зарядов или диполей, важного с точки зрения геофизических приложений [Шуман, 2012а].

В заключение заметим, что дробное интегродифференциальное исчисление позволяет учесть эффекты пространственной и временной нелокальности процесса в качестве единого математического формализма.

О воздействии на геосреду электромагнитных полей. Коснемся теперь другой стороны проблемы геоэлектродинамики, интерес к которой в последние годы заметно возрос в связи с изучением влияния мощных электромагнитных полей (МГД-генераторы, магнитные бури) на деформационные процессы в земной коре с целью плавного снятия или перераспределения

тектонических напряжений в ней (см., например, [Тарасов и др., 1995; Тарасов, 1997; Авагимов и др., 2005; Гуфельд, 2007; Богомолов, 2012 и цитируемую там литературу]). При этом отклик геосреды на действие этих источников связывают обычно с активизацией режима слабой сейсмичности.

Широкий спектр электромагнитных эффектов, сопровождающих деформации и разрушение твердых тел, приведен в монографии [Сурков, 2000]. Отмечается, что на фронте ударной взрывной волны, распространяющейся в твердом диэлектрике, возникает скачок электрического потенциала, который ассоциируется с эффектом ударной поляризации. Предполагается, что разделение зарядов на фронте ударной волны обусловлено различной подвижностью дефектов структуры. При этом электрические поля возникают вблизи пор и трещин, где деформации среды велики. Процесс закрытия (схлопывания) пор в ударной волне сопровождается увеличением плотности заряда, накапливающегося на поверхностях пор или трещин, что, в свою очередь, ведет к локальному пробою диэлектрика.

Для выяснения механизмов упомянутых электромагнитных эффектов и выяснения их физической природы выполнен большой объем лабораторных исследований поведения образцов горных пород кристаллической и аморфной структур, находящихся под давлением и вибровоздействием (ИФЗ РАН, ОИВТ РАН, Научная станция РАН (Бишкек) и др.). При экспериментальных исследованиях на образцах горных пород основной упор был сделан на обнаружение откликов в акустической эмиссии, связанной с трещинообразованием, на тестовые воздействия вибраций и электромагнитных импульсных воздействий, их влияния на процесс разрушения нагруженных образцов [Богомолов, 2012].

В Институте кристаллографии РАН обнаружен эффект возрастания микропластичности при деформировании ионных кристаллов в скрещенных электрическом и магнитном полях, установлено их влияние на ориентацию плоскости макротрещин в образцах из ионных кристаллов [Гохберг и др., 1988].

Удивительно, но упомянутый эффект возрастания микро-

пластичности имеет исключительно простое физическое толкование: если иметь дело с наложением электрического и магнитного статических полей, векторы которых взаимно перпендикулярны, то такое поле является носителем момента количества движения [Скобельцын, 1973].

В итоге к настоящему времени имеется обширный набор моделей, описывающих, по крайней мере качественно, влияние электромагнитных полей как на одиночные трещины, так и на поведение их ансамбля. Однако не создано общей модели возбуждения отклика акустической эмиссии на электромагнитное воздействие, объединяющей теоретические подходы и лабораторный эксперимент. Остается также открытым вопрос о возможности переноса экспериментальных, лабораторных данных на реальную геосреду, в частности для описания воздействия электромагнитного поля на напряженно-деформированное состояние земной коры. Следует также признать: несмотря на предпринятые усилия по изучению реакции геосреды на энерговоздействия, в частности ее облучения мощными электромагнитными импульсами, оно сдерживается концептуально, поскольку общей теории такого воздействия пока нет, а имеющиеся подходы и дискуссии по этому вопросу, скрывающиеся зачастую под размытым, неопределенным, но популярным термином «триггерное воздействие электромагнитного излучения» [Соболев и др., 2011; Богомолов, 2012], носят ограниченный и фрагментарный характер. (На проблематичность буквального переноса смысла этого термина на реальные объекты, в частности геосреду, указывал И. Л. Гуфельд [Гуфельд, 2007], однако это замечание осталось, по существу, незамеченным.)

Попытки определенной конкретизации физики процесса за счет выделяемого в среде в результате такого воздействия тепла [Файнберг и др., 2004] или предположения о пондемоторном (механическом) воздействии возбуждаемых токов на геосреду (земную кору) [Авагимов и др., 2005] также нуждаются в обосновании и детализации.

Очевидно, в этой связи имеет смысл остановиться более подробно на некоторых старых вопросах электродинамики ма-

териальных сред, связанных с определением плотностей диссипируемой в них энергии электромагнитного поля, балансных уравнений для энергии и импульса, физических основ нетеплового действия электромагнитных полей на материальные среды.

Разумеется, как уже отмечалось, нас будет интересовать лишь принципиальная сторона этих вопросов, которые все еще продолжают оставаться предметом дискуссий [Гинзбург, 1973; Давидович, 2010]. Кажется очевидным, что необходимая физическая общность рассмотрения может быть достигнута в классическом смысле на основе К-формы уравнений Максвелла (2) в материальной среде.

Балансные уравнения для энергии и импульса. Умножая скалярно каждое из уравнений системы (2) на вектор другого поля, сложив результаты и используя векторное тождество

$$\mathbf{a}(\nabla\times\mathbf{b})-\mathbf{b}(\nabla\times\mathbf{a})=-\nabla(\mathbf{a}\times\mathbf{b}),$$

традиционным путем получим

$$\nabla\cdot\mathbf{S}(\mathbf{r},t)+\frac{1}{c}\left(\mathbf{E}\frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t}+\mathbf{H}\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}\right)=-\frac{4\pi}{c}\mathbf{E}(\mathbf{r},t)\cdot\mathbf{J}_{\text{ext}}(\mathbf{r},t), \qquad (5)$$

где ∇ — оператор Гамильтона, $\mathbf{S}(\mathbf{r},\ t)=\mathbf{E}(\mathbf{r},\ t)\times\mathbf{H}(\mathbf{r},\ t)$ — вектор Пойнтинга. Правая часть равенства (5) — это плотность мощности, затрачиваемая внешними источниками на создание поля.

Далее, следуя [Давидович, 2010], запишем равенство (5) в форме, характерной для уравнения баланса:

$$\nabla\cdot\mathbf{S}(\mathbf{r},t)+\frac{\partial W(\mathbf{r},t)}{\partial t}=-\frac{4\pi}{c}\mathbf{E}(\mathbf{r},t)\mathbf{J}_{\text{ext}}(\mathbf{r},t), \qquad (6)$$

Первое слагаемое справа в уравнении (6) — это плотность вытекающего потока мощности поля, а второе — плотность накапливаемой мощности поля и вещества. Для подсчета затраченной работы эту величину необходимо проинтегрировать:

$$W(\mathbf{r},t)=\frac{1}{c}\int_0^t\left[\mathbf{E}(\mathbf{r},t')\frac{\partial\mathbf{D}(\mathbf{r},t')}{\partial t}+\mathbf{H}(\mathbf{r},t')\frac{\partial\mathbf{B}(\mathbf{r},t')}{\partial t}\right]dt, \qquad (7)$$

Согласно работе [Давидович, 2010], именно эту величину, а не $\frac{1}{c}\left[\mathbf{E}\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}+\mathbf{H}\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}\right]$, как это обычно принято считать, следует отождествлять с $W(\mathbf{r}, t)$.

Важно подчеркнуть, что определяемая согласно (7) энергия, затраченная на создание поля и изменение импульса вещества, зависит от предыстории процесса. При этом диссипация энергии связана не только с проводимостью среды, но и с запаздыванием ее поляризации.

Остановимся далее на рассмотрении уравнения баланса импульса, вывод которого менее известен [Гинзбург, 1973]. Умножая первое уравнение системы (2) слева векторно на $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$, а второе — на $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ и складывая результат, запишем

$$\mathbf{B}(\mathbf{r},t)\times\nabla\times\mathbf{H}(\mathbf{r},t)+\mathbf{D}(\mathbf{r},t)\times\nabla\times\mathbf{E}(\mathbf{r},t)+\frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial t}\left[\mathbf{D}(\mathbf{r},t)\times\mathbf{B}(\mathbf{r},t)\right]=$$

$$=\frac{4\pi}{c}\left[\mathbf{B}(\mathbf{r},t)+\mathbf{J}_{\text{ext}}(\mathbf{r},t)\right]=\mathbf{F}_{\text{Лор}}(\mathbf{r},t)\,, \qquad (8)$$

где $\mathbf{F}_{\text{Лор}}(\mathbf{r}, t)$ — сила Лоренца, действующая на сторонние токи, т. е. сила, затрачиваемая сторонними источниками на создание импульса поля и вещества; второе слагаемое в левой части (8) — производная плотности импульса системы поле—вещество по времени.

Ясно, что передача импульса веществу производится посредством токов поляризации.

Обратим еще раз внимание на нестационарный характер балансных уравнений (6), (8), в то время как современная электродинамика все еще основывается преимущественно на теоретических методах и подходах, разработанных для анализа квазигармоничных электромагнитных полей. Далее, в электродинамической теории существуют два подхода или формализма — полевой и потенциальный. Последний подразделяется на трехмерный и четырехмерный (четырехвекторный) [Бредов и др., 1985; Грицунов, 2008]. Сегодня чаще всего используется полевой формализм, в котором напряженность электрического и индукция магнитного поля являются силовыми характеристи-

ками взаимодействия зарядов. Потенциальный четырехмерный, будучи энергетической характеристикой электромагнитных взаимодействий, применяется в более ограниченном масштабе. Любопытно, что ни полевой, ни четырехмерный потенциальный формализмы, вообще говоря, не являются вполне самодостаточными: с одной стороны, вклад в объемную плотность четырехвектора энергии-импульса вносят электрическое и магнитное поля, а с другой — в функции Лагранжа для системы заряженных частиц изначально представлены потенциалы [Грицунов, 2008].

Об электродинамике нетепловых процессов в материальных средах. Начнем с изложения и анализа основ электродинамики нетепловых процессов в средах, предложенной в работе [Сидоренков, 2007], последовательно, по его мнению, описывающей электрическую и магнитную поляризацию среды, передачу ей момента электромагнитного импульса, влияния электромагнитных полей на ее физико-механические свойства.

Отличительная особенность предлагаемого подхода, ограниченного классом сред с локальной электронейтральностью и простейшими материальными уравнениями $\mathbf{D}=\varepsilon\mathbf{E}$, $\mathbf{B}=\mu\mathbf{H}$, $\mathbf{j}=\sigma\mathbf{E}$, состоит в нетрадиционной трактовке векторных потенциалов электрического и магнитного типа и рассмотрении, наряду с электромагнитным полем с компонентами **E** и **H**, электрического поля с компонентами **E** и $\mathbf{A}^e$, магнитного с компонентами **H** и $\mathbf{A}^m$, поля электромагнитного векторного потенциала с компонентами $\mathbf{A}^e$ и $\mathbf{A}^m$ — электрический и магнитный векторные потенциалы:

$$\mathbf{B} = \mathrm{rot}A_m\,,\ \mathbf{D} = \mathrm{rot}A^e\,,\ \mathrm{div}(\varepsilon\mathbf{A}^m) = 0\,,$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}^{m'}}{\partial t}\,,\ \mathbf{H} = \frac{\sigma}{\varepsilon}\mathbf{A}^e + \frac{\partial \mathbf{A}^e}{\partial t}\,,\ \mathrm{div}(\mu\mathbf{A}^e) = 0\,. \qquad (9)$$

По мнению [Сидоренков, 2007], соотношения (9) фундаментальны и перспективны с точки зрения физической интерпретации поля электромагнитного векторного потенциала. Система (9) описывает вихревое векторное поле в виде совокупности

функционально связанных между собой четырех вихревополевых компонент **E**, **H** и $\mathbf{A}^m$, $\mathbf{A}^e$, которые автором названы реальным электромагнитным полем [Сидоренков, 2011]. Однако, соглашаясь с оригинальностью такого подхода, он вызывает определенные сомнения и опасения. В частности, автор совершенно не касается физического смысла полей в конденсированной среде, фигурирующих в (9), а мнение автора о безуспешности описания с помощью уравнений Максвелла переноса в пространстве момента электромагнитного импульса не соответствует действительности [Давидович, 2010]. К примеру, показано, что так называемая К-форма уровней Максвелла в принципе позволяет решить любую электромагнитную задачу [Виноградов, 2002]. Можно привести и более частные замечания.

Как следует из стандартных определений, одним и тем же напряженностям электромагнитного поля **E** и **B** соответствует широкий класс потенциалов. Действительно, векторный потенциал $\mathbf{A}'_m = \mathbf{A}^m - \mathrm{grad}\chi$, где χ — произвольная скалярная функция, не изменяющая значения вектора $\mathbf{B} = \mathrm{rot}\mathbf{A}'_m = \mathrm{rot}\mathbf{A}^m$. Чтобы при таком преобразовании не претерпел изменений и вектор **E**, необходимо положить

$$\varphi' = \varphi + \frac{1}{c}\frac{\partial \chi}{\partial t}.$$

Иначе говоря, векторный потенциал определен с точностью до градиента, а скалярный — с точностью до производной по времени от произвольной непрерывной функции координат и времени χ. Этим произволом можно воспользоваться для упрощения уравнений, которым должны удовлетворять векторный и скалярный потенциалы, связав их дополнительным соотношением (калибровки Кулона и Лоренца).

При задании калибровки потенциалов условием ϕ=0 уравнения Максвелла могут быть представлены в форме

$$\mathrm{rot}\mathbf{A} = \mathbf{B} = \mu\mathbf{H}, \quad \mathbf{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \frac{\mathbf{D}}{\varepsilon},$$

$$\operatorname{div}\left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}\right) = -\frac{4\pi\rho c}{\varepsilon},$$

$$\operatorname{rotrot}\mathbf{A} + \frac{\varepsilon\mu}{c^2}\frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = \frac{4\pi\mu}{c}\mathbf{J}, \qquad (10)$$

где ρ — плотность свободных зарядов, ε и μ — диэлектрическая и магнитная проницаемости.

Согласно работе [Morse, Feshbach, 1953], такая калибровка предпочтительна и удобна при отсутствии свободных зарядов. В частности, она приводит к «правильному» виду плотности энергии и плотности потока энергии.

Заметим, что последнее уравнение в (10) — это уравнение Лагранжа—Эйлера. При этом интенсивность поля

$$\mathbf{S} = \frac{c}{4\pi}\left[\mathbf{E} \times \mathbf{H}\right],$$

а его импульс

$$\mathbf{P} = -\frac{\varepsilon}{4\pi}\nabla \cdot \mathbf{A}\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}.$$

Однако такое рассмотрение не является исчерпывающим. Так, при решении краевых задач электродинамики анизотропных сред появляется необходимость введения «потенциалов нулевого поля», не устранимых калибровочными преобразованиями и необходимыми для удовлетворения граничных условий [Тихонов 1959; Четаев, 1962].

Очевидно, имеются весомые основания рассматривать векторный потенциал в качестве физической переменной, имеющей фундаментальный характер [Арнольд, 2004]. Однако и здесь следует согласиться с автором [Сидоренков, 2007, 2011], электромагнитное воздействие на твердые тела не сводится только к их нагреву: дефекты их структуры, определяющие механические свойства материалов, обладают электрическими зарядами и реагируют на приложенное к ним электромагнитное поле или протекание тока.

Как известно, феномен нетеплового действия электромагнитных полей на свойства материальных сред нашел широкое

применение в технологиях обработки металлов [Спицын, Троицкий, 1985]. Это — электропластический и магнитопластический эффекты [Зуев, 1998].

В соответствии с реакцией твердых тел на электрические поля существует две разновидности электропластического эффекта, характерные для диэлектриков и проводников. В частности, кристаллы диэлектриков содержат различные заряженные точечные и линейные дефекты (дислокации), что делает их чувствительными к электрическому полю. Оно может действовать на них силой Кулона, пропорциональной величине электрического заряда. Очевидно, эта сила невелика, но иногда ее бывает достаточно, чтобы вызвать движение дислокаций и соответственно пластическую деформацию.

Что касается металлов, то там механизм воздействия мощных электрических импульсов иной: движущиеся при протекании тока электроны рассеиваются на дислокациях и передают им свой импульс. Такое явление получило название «электронного ветра». Однако для того, чтобы существенно повлиять на динамику пластической деформации металла, необходимо пропускание чрезвычайно мощных импульсов электрического тока плотностью порядка 10^9 А/м^2, что весьма проблематично: такую плотность тока, вообще говоря, можно создать только в достаточно тонких проводниках с поперечным сечением в несколько квадратных миллиметров [Зуев, 1998].

Заметим, что современное понимание пластической деформации основано на синергетических представлениях о физике явления, когда деформируемое тело рассматривается в качестве сильнонеравновесной самоорганизующейся многоуровневой системы с эволюцией потери сдвиговой устойчивости кристаллической решетки на разных масштабных уровнях [Дидык, Кузнецов, 2008].

Что же дают изложенные механизмы и представления о тепловом и нетепловом воздействии электромагнитных импульсов на физико-механические свойства материалов применительно к геосреде? Как уже отмечалось, в этом случае мы имеем дело со средой, динамическое поведение которой нельзя опи-

сать в рамках только представлений механики разрушения [Гуфельд, Матвеева, 2011]. Далее, воздействия на геосреду различными физическими полями совершенно неадекватно воздействию тех же полей на лабораторный образец, даже нагруженный [Гуфельд, 2007]. Ясно, что в случае геосреды ситуация существенно иная. В частности, согласно расчетам, выполненным для типичных МГД-импульсов, даже вблизи генератора плотность тока в геосреде достигает лишь величин порядка $8 \cdot 10^{-3}$ А/м, а с удалением от источника быстро убывает и уже на расстояниях 10—15 км не превышает 10 % от максимальных значений [Авагимов и др., 2005]. Значения плотностей напряжений, вызванных пондеромоторным воздействием возбуждаемых в среде токов на горные породы, также невелики (величина df пондеромоторного воздействия на элемент $d\mathbf{J}$ возбуждаемого в земле МГД-генератором тока оценивалась как $df=[d\mathbf{J}\times\mathbf{B}_0]$, где $\mathbf{B}_0$ — постоянное магнитное поле Земли в пределах исследуемой площади). В итоге авторы приходят к важному выводу: «... пондеромоторные силы, токи и порождаемое ими тепло если и являются инициаторами выделения упругой энергии, то должны существовать еще какие-то промежуточные механизмы, преобразующие и перераспределяющие рассмотренные выше поля в упругие напряжения и проявляющиеся на больших территориях» [Авагимов и др., 2005, с. 64].

Следуя И. Л. Гуфельду [Гуфельд, 2007], можно предположить, что в реальных условиях земной коры конкуренцию к термическим флуктуациям и нетепловым параметрам, влияющим на объемно-напряженное состояние геосреды и вызываемым внешним электромагнитным воздействием, вполне могут составить процессы взаимодействия легких газов с твердой фазой литосферы. Как известно, и гелий, и водород могут аккумулировать значительную энергию путем вхождения в жидкие и твердые растворы, кластерные структуры и создание химических соединений. Воздействуя на динамику и кинетику восходящих потоков легких газов весьма слабыми источниками вибраций или электромагнитных полей, можно оказывать влияние на параметры объемно-напряженного состояния геосреды.

Важно, что в этом случае управляющее воздействие может быть не энергетически мощным, а правильно организованным топологически и технически [Гуфельд, 2007; Гуфельд и др., 2011; Шуман, 2011б, 2013б]. При этом структурные изменения за счет диффузии легких газов в геосреде не требуют критических значений РГ-параметров (в отличие от фазовых переходов) и могут протекать в широком диапазоне температур. Но, как известно, геосреда в подавляющем большинстве случаев реактивна по отношению к электромагнитным полям. Однако переменные токи и электромагнитные поля способны возбуждать в любой конденсированной среде механические колебания — акустические волны. Эти волны, генерируемые в скин-слое источника электромагнитного поля совокупным явлением, известным как электромагнитно-акустическое преобразование, способны проникать в те области геосреды за пределами скин-слоя, которые, вообще говоря, являются непрозрачными для электромагнитных, и выполнять функцию эффективного регулятивного фактора, влияющего на динамику восходящего потока легких газов. При этом нас не должна смущать кажущаяся проблема несоответствия энергетических масштабов процессов в геосреде и мощности регулятивного импульса: важен поиск частотного оптимума влияния, его согласование с уровнем и характеристиками шумов в системе [Шуман, 2013б]. В этом контексте предельно ясны роль и значение комплексного мониторинга, совершенствования сбора и анализа необходимой информации [Шуман, 2011б]. Таким образом, неравновесность, нелинейность, неустойчивость, фрактальность структуры геосреды — вот те основные принципы, на которых, по нашему мнению, должна строиться теория электромагнитного воздействия на геосреду с целью снижения избыточных напряжений в ней и, возможно, управления сейсмическим процессом.

Электромагнитные релаксационные процессы в природных средах. Как известно, большинство горных пород и минералов, слагающих земную кору, можно отнести к несовершенным диэлектрикам — средам с низкими потерями. При наличии электромагнитного поля в таких средах возникает как направ-

ленное движение свободных зарядов (токи проводимости), так и колебательное движение связанных зарядов (поляризация). При этом сквозная электропроводность среды в общих чертах определяется наличием и плотностью свободных носителей зарядов, их подвижностью и величиной энергии активации, в то время как ее поляризация обусловлена спецификой взаимодействия зарядов и протекания тока.

Природа и механизмы поляризации довольно различны — дипольная, электронная, ионная. Преобладание того или иного механизма поляризации определяется составом и строением вещества, его структурой и состоянием, а также характером воздействующего поля [Киселев и др., 1987].

Одна из актуальных задач современной геофизики — описание процессов и явлений, имеющих место в системах со степенной нелокальностью, памятью и фрактальностью. Зарождаются физические концепции и создается математический аппарат нового направления исследований — дробная динамика (fraction dynamics). Свойства и явления, рассматриваемые дробной динамикой, во многом расширяющие существующие представления, — эрединарность (свойство системы или процесса сохранять память о своем прошлом), немарковская динамика, пространственная нелокальность и нелокальное взаимодействие, фрактальность структуры [Тарасов, 2011]. Заметим, что марковость и немарковость — свойство описания, а не самого процесса.

Как уже отмечалось, обычная электродинамика линейна и соответствующую теорию взаимодействия среды и электромагнитного поля можно строить по «металлическому» типу, используя материальное уравнение $\mathbf{j}=\sigma\mathbf{E}$, где $\mathbf{j}$ — плотность наведенного тока, либо по «диэлектрическому», используя связь поляризации $\mathbf{P}(\mathbf{r}, t)$ с полем $\mathbf{E}$:

$$\mathbf{P}(\mathbf{r},t)=\chi\mathbf{E}\,. \qquad (11)$$

Здесь χ — диэлектрическая восприимчивость [Ильинский, Келдыш, 1989]. В наиболее общей форме линейная связь векторов $\mathbf{j}$

и **E** или **P** и **E**, зависящих от координат и времени, может быть записана равенствами

$$J_\alpha(\mathbf{r},t) = \int \sigma_{\alpha\beta}(\mathbf{r},\mathbf{r}';t,t')E_\beta(\mathbf{r}',t')d\mathbf{r}dt',$$

$$P_\alpha(\mathbf{r},t) = \int \chi_{\alpha\beta}(\mathbf{r},\mathbf{r}';t,t')E_\beta(\mathbf{r}',t')d\mathbf{r}dt'. \qquad (12)$$

Для стационарных и пространственно однородных сред материальные уравнения (11), (12), имеющие интегральный характер, могут быть приведены к алгебраическому виду с помощью преобразования Фурье.

Часто в рассмотрение вводится проницаемость ε:

$$\varepsilon_{\alpha\beta} = \delta_{\alpha\beta} + 4\pi\chi_{\alpha\beta}, \qquad (13)$$

связывающая индукцию **D** с электрическим полем **E** при использовании уравнений Максвелла (2) (К-формы). В этом случае система (2) записывается для гармонических полей, а параметры σ и χ представляются комплексными частотно-зависимыми функциями. Требование к этим функциям состоит в том, чтобы их реальная часть была положительной, а сами функции — аналитическими [Светов, 1992].

В связи с актуальностью вопроса и значительным расширением временного и частотного диапазонов измерений к настоящему времени накоплено большое количество экспериментальных данных, указывающих на существование процессов неэкспоненциальной релаксации, и предложено несколько эмпирических выражений, аппроксимирующих полученные частотные и фазовые характеристики (см., например, [Jonscher, 1983; Светов, 1992; Нигматуллин, Рябов, 1997; Эпов, Антонов, 2000; Филатов, 2002; Тарасов, 2009; Kamenetsky et al., 2010]).

Для комплексной восприимчивости $\chi(i\omega)$ — это классическое выражение Дебая:

$$\chi(i\omega) = \frac{1}{1 + i\omega/\omega_p}, \qquad (14)$$

выражение Коула—Коула:

$$\chi(i\omega) = \frac{\chi_0}{1 + \left(i\omega/\omega_p\right)^{\alpha}}, \tag{15}$$

Коула—Девидсона:

$$\chi(i\omega) = \frac{\chi_0}{\left(1 + \left(i\omega/\omega_p\right)\right)^{\beta}}, \ 0 < \beta \le 1, \tag{16}$$

Гаврильяка—Негами:

$$\chi(i\omega) = \frac{\chi_0}{\left(1 + \left(i\omega/\omega_p\right)^{\gamma}\right)^{\delta}}, \ 0 < \gamma \le 1, \ 0 < \delta \le 1, \tag{17}$$

где χ_0 — статическая поляризация; ω — круговая частота; ω_p — частота пика диэлектрических потерь; α и β, γ и δ — некоторые параметры.

Заметим, что формула Гаврильяка—Негами носит обобщающий характер, так как при условии $\gamma=\delta=1$ получаем идеальный дебаевский отклик, при $\delta=1$, $\gamma=\alpha$ имеет место формула Коула—Коула, а при $\gamma=1$, $\delta=\beta$ — Коула—Девидсона.

В то же время экспериментально установлено, что для большинства материалов диэлектрическая восприимчивость в широкой области частот удовлетворяет дробно-степенному закону, называемому универсальным откликом Джоншера [Солодуха, Григорян, 2007; Тарасов, 2009; Tarasov, 2008], т. е. частотная зависимость диэлектрической восприимчивости $\chi(\omega) = \chi'(\omega) - i\chi''(\omega)$ может быть описана соотношениями

$$\chi'(\omega) \sim \omega^{n-1}, \ \chi''(\omega) \sim \omega^{n-1}, \ \omega >> \omega_p,$$

$$\chi'(0) - \chi'(\omega) \sim \omega^{m}, \ \chi''(\omega) \sim \omega^{m}, \ \omega << \omega_p, \tag{18}$$

где $\chi'(0)$ — статическая поляризация, $0<n, m<1$, ω_p — частота пика потерь.

В итоге для области частот $\omega>>\omega_p$ дробно-степенной закон (18) может быть представлен в виде

$$\chi(\omega) = \chi_\alpha (i\omega)^\alpha , \ 0 < \alpha < 1 , \tag{19}$$

с некоторыми положительными константами χ_α и $\alpha=1-n$, а для области частот ниже пика максимальных потерь $\omega << \omega_p$ —

$$\chi(\omega) = \chi(0) - \chi_\beta (i\omega)^\beta , \ 0 < \beta < 1 , \tag{20}$$

с положительными константами $\chi(0)$, χ_β, $\beta=m$, подлежащими экспериментальному определению. При этом $\chi(0)$ соответствует недиссипативной части полной восприимчивости $\chi(\omega)$, а $\chi_\beta(i\omega)^\beta$ — диссипативной.

В литературе предпринимались многочисленные попытки понять эти эмпирические зависимости, опираясь на концепцию распределения релаксации, когда макроскопическая функция релаксации $f(t)$ представляется в виде суммы экспоненциальных функций с подходящими амплитудами и временами релаксации [Нигматуллин, Рябов, 1997]. Однако концепция распределения релаксации не позволяет дать физическую трактовку параметров, входящих в выражения (14)—(17), что, по мнению [Нигматуллин, Рябов, 1997], свидетельствует о ее незавершенности. В качестве альтернативы распределенной релаксации ими предложена концепция самоподобного процесса релаксации. Основное ее отличие состоит в предположении, что взаимодействие с внешним полем, вызывающим релаксацию, носит прерывистый характер. При этом моменты времени, когда это взаимодействие происходит, распределены по некоторому самоподобному (фрактальному) множеству. Тогда параметр β, содержащийся в выражении Коула—Девидсона (16), имеет смысл фрактальной размерности множества, на котором статистически распределены моменты времени, когда это взаимодействие существует.

Таким образом, весьма сложно построить модель, которая была бы одновременно и реалистичной, и поддающейся теоретическому анализу. Видны и трудности физического характера — поляризация среды, в том числе и геосреды, многоаспектный и многофакторный процесс: она возникает на различных структурных уровнях, начиная с дефектов кристаллической

решетки и заканчивая границами зерен, трещинами, порами и другими микроскопическими неоднородностями. И все же выражения (14)—(17) представляют необходимую минимальную основу для истолкования экспериментальных данных в едином систематическом виде. Разумеется, при этом следует учитывать ряд деталей, отличающих поведение горных пород в их естественном залегании от лабораторных исследований их образцов.

Остановимся далее на частном примере, относящемся к динамике электромагнитного поля в диэлектрической среде с потерями. Воспользовавшись дробно-степенным законом (19), для плотности поляризации $\mathbf{P}(\mathbf{r}, t)$ в области высоких частот $\omega >> \omega_p$ можно записать [Tarasov, 2008, Тарасов, 2009]

$$\mathbf{P}(\mathbf{r},t) = \chi_\alpha (\mathbf{I}_+^\alpha \mathbf{E})(\mathbf{r},t)\,,\ 0<\alpha<1\,, \tag{21}$$

где $\left(\mathbf{I}_+^\alpha f\right)(t) = \dfrac{1}{\Gamma(\alpha)} \int\limits_{-\infty}^{t} \dfrac{f(t')dt'}{(t-t')^{1-\alpha}}$ — дробный интеграл Лиувилля.

Соответственно, исходя из универсального дробно-степенного закона (20), для области низких частот $\omega << \omega_p$ запишем

$$\mathbf{P}(\mathbf{r},t) = \chi(0)\mathbf{E}(\mathbf{r},t) - \chi_\beta \left(D_t^\beta \mathbf{E}\right)(\mathbf{r},t)\,,\ 0<\beta<1\,, \tag{22}$$

где $\left(D_t^\beta f\right)(t) = \dfrac{1}{\Gamma(k-\beta)} \dfrac{\partial^k}{\partial t^k} \int\limits_{-\infty}^{t} \dfrac{f(t')dt'}{(t-t')^{\beta-k+1}}$ — дробная производная Лиувилля, $\Gamma(\alpha)$ — гамма-функция.

Таким образом, плотность поляризации $\mathbf{P}(\mathbf{r}, t)$ для области высоких частот пропорциональна дробному интегралу Лиувилля от электрического поля $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$, а в области низких — дробной производной Лиувилля от электрического поля $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$.

Соотношения (21), (22), содержащие интегрирования и дифференцирования нецелых порядков, позволяют выписать уравнения Максвелла для рассматриваемого типа диэлектрических сред и получить соответствующие волновые уравнения для электрического и магнитного полей в них. С учетом (21),

(22) система уравнений Максвелла (К-форма (2)) примет следующий вид:

$$\mathrm{rot}\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = -\frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r},t)}{\partial t},$$

$$\mathrm{rot}\mathbf{H}(\mathbf{r},t) = \begin{cases} \dfrac{1}{c}\dfrac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r},t)}{\partial t} + \dfrac{4\pi}{c}\chi_\alpha (D_t^{1-\alpha}\mathbf{E})(\mathbf{r},t) + \\ + \dfrac{4\pi}{c}\mathbf{J}_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r},t) \text{ при } \omega >> \omega_p, \\ \dfrac{1}{c}\left[1+4\pi\chi(0)\right]\dfrac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r},t)}{\partial t} - \dfrac{4\pi}{c}\chi_\beta (D_t^{1+\beta}\mathbf{E})\times \\ \times(\mathbf{r},t) + \dfrac{4\pi}{c}\mathbf{J}_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r},t) \text{ при } \omega << \omega_p, \end{cases}$$

$$\mathrm{div}\mathbf{D}(\mathbf{r},t) = 4\pi\rho_{\mathrm{ext}};\ \mathrm{div}\mathbf{B}(\mathbf{r},t) = 0;$$

$$\alpha = 1-n;\ \beta = m;\ 0<\alpha<1;\ 0<\beta<1. \qquad (23)$$

Заметим, что $\mathrm{div}\mathbf{E}\neq 0$ для $\rho_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r}, t)=0$. При этом система (23) содержит дробные производные Лиувилля от электрического поля $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ порядка $1-\alpha$ и $1+\beta$.

На основании системы (23) можно получить дробные дифференциальные уравнения для напряженности электрического поля в области высоких частот $\omega>>\omega_p$:

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{r},t)}{\partial t^2} + \frac{\chi_\alpha}{c^2}\left(D_+^{2-\alpha}\mathbf{E}\right)(\mathbf{r},t) + \frac{1}{\mu}\mathrm{rotrot}\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = \frac{4\pi}{c}\frac{\partial \mathbf{J}_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r},t)}{\partial t},$$

где $0<\alpha<1$, и низких частот $\omega<<\omega_p$:

$$\frac{1}{V_\beta^2}\frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{r},t)}{\partial t^2} - \frac{\alpha_\beta}{V_\beta^2}\left(D_t^{2+|\beta}\mathbf{E}\right)(\mathbf{r},t) + \frac{1}{\mu}\mathrm{rotrot}\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = \frac{4\pi}{c}\frac{\partial \mathbf{J}_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r},t)}{\partial t},$$

где $0<\beta<1$, $V_\beta^2 = \dfrac{1}{\varepsilon_0\mu\left[1+\chi(0)\right]}$, $\alpha_\beta = \dfrac{\chi_\beta}{1+\chi(0)}$, и соответственно уравнения для индукции магнитного поля при $\omega>>\omega_p$ и $\omega<<\omega_p$.

Полагая, что поле $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ в эксперименте реализуется как $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)=0$ для $t\le 0$ и $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)\neq 0$ для $t>0$ [Тарасов, 2009], имеем

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\mathbf{B}(\mathbf{r},t)}{\partial t^2}+\frac{4\pi\chi_\alpha}{c^2}\left({}_0D_+^{2-\alpha}\mathbf{B}\right)(\mathbf{r},t)-\frac{1}{\mu}\nabla^2\mathbf{B}(\mathbf{r},t)=\frac{4\pi}{c}\mathrm{rot}\mathbf{J}_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r},t),$$

$$\omega>>\omega_p,\ \alpha=1-n,$$

и

$$\frac{\left[1+4\pi\chi(0)\right]}{c^2}\frac{\partial^2\mathbf{B}(\mathbf{r},t)}{\partial t^2}-\frac{4\pi\chi_\beta}{c^2}\left({}_0D_+^{2+\beta}\mathbf{B}\right)(\mathbf{r},t)-\frac{1}{\mu}\nabla^2\mathbf{B}(\mathbf{r},t)=\frac{4\pi}{c}\mathrm{rot}\mathbf{J}_{\mathrm{ext}}(\mathbf{r},t),$$

$$\omega<<\omega_p,\ \beta=m,$$

где ${}_0D_+^{2-\alpha}$ и ${}_0D_+^{2+\beta}$ — дробные производные Римана—Лиувилля на полуоси $[0, \infty)$

$$\left({}_0D_+^{2-\alpha}f\right)(t)=\frac{1}{\Gamma(\alpha)}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\int_0^t\frac{f(t')dt'}{(t-t')^{1-\alpha}}.$$

Следовательно, электромагнитное поле в рассматриваемом классе диэлектрических сред с потерями, восприимчивость которых в широком диапазоне частот удовлетворяет дробно-степенной зависимости, описывается дифференциальными уравнениями с производными нецелого порядка по времени, порядок которых равен $2-\alpha$ и $2+\beta$, где $0<\alpha=(1-n)<1$; $0<\beta=m<<1$, и явно выражается через экспериментально измеримые показатели степенной зависимости универсального отклика.

Аналогичный результат может быть получен непосредственно на основе аппроксимации Гаврильяка—Негами, которая для дисперсии диэлектрической проницаемости имеет вид [Sibatov, Uchaikin, 2013]

$$\varepsilon(\omega)=\varepsilon_\infty+\frac{\varepsilon_{\mathrm{st}}-\varepsilon_\infty}{\left[1+\left(i\omega/\omega_p\right)^\alpha\right]^\beta},$$

где ε_∞ — диэлектрическая проницаемость при $\omega\to\infty$, $\varepsilon_{\mathrm{st}}$ — статическая диэлектрическая проницаемость. В этом случае на основании специальной формы дробного оператора

$$\left[1+\omega_p^{-1}{}_0D_+^{\alpha}\right]^{\beta} f(t)$$

авторы приходят к материальному уравнению

$$\mathbf{D}(\mathbf{r},t)=\varepsilon_{\infty}\mathbf{E}(\mathbf{r},t)+\left(\varepsilon_{\mathrm{st}}-\varepsilon_{\infty}\right)\left[1+\omega_p^{-1}{}_0D_+^{\alpha}\right]^{-\beta}\mathbf{E}(\mathbf{r},t)\,,$$

что в сочетании с уравнениями Максвелла позволяет получить волновое уравнение:

$$\frac{\varepsilon_{\infty}}{c^2}\frac{\partial^2\mathbf{E}}{\partial t^2}+\frac{\varepsilon_{\mathrm{st}}-\varepsilon_{\infty}}{c^2}\left[1+\omega_p^{-1}{}_0D_+^{\alpha}\right]^{-\beta}\frac{\partial^2\mathbf{E}}{\partial t^2}+\frac{1}{\mu}\mathrm{rotrot}\mathbf{E}=-\frac{4\pi}{c}\frac{\partial\mathbf{j}}{\partial t}\,.$$

На больших временах $t>>1/\omega_p$ это уравнение преобразуется к виду [Sibatov, Uchaikin, 2013]

$$\frac{\varepsilon_{\mathrm{st}}}{c^2}\frac{\partial^2\mathbf{E}}{\partial t^2}-\frac{\varepsilon_{\mathrm{st}}-\varepsilon_{\infty}}{c^2}\beta\omega_p^{-\alpha}{}_0D_+^{2+\alpha}\mathbf{E}+\frac{1}{\mu}\mathrm{rotrot}\mathbf{E}=-\frac{4\pi}{c}\frac{\partial\mathbf{j}}{\partial t}\,,$$

что согласуется с результатом, полученным В. Е. Тарасовым на основе универсального отклика Джоншера.

Примечательное свойство процессов релаксации, описываемых дробными дифференциальными уравнениями — существование дробно-степенных асимптотик, т. е. их дробно-степенное затухание.

Полученные уравнения существенно расширяют классические представления о взаимодействии среды с электромагнитным полем и его динамике. В частности, меняется общая картина процесса взаимодействия, могут быть получены его новые динамические свойства [Тарасов, 2011]. При этом существование степенных законов подтверждает самоподобный характер процессов и указывает на необходимость применения фрактальных моделей и понятий. Эти уравнения являются общими для широкого класса сред вне зависимости от их структуры, состава и природы поляризации — дипольной, электронной или ионной.

Полученные результаты указывают на необходимость детализации балансных уравнений для энергии и импульса (6), (8) с

учетом соотношений для плотности поляризации $\mathbf{P}(\mathbf{r}, t)$ (21), (22), из которых следует, что передача импульса веществу производится посредством токов поляризации — дипольной, электронной, ионной. Примечательно, что достоверность полученных таким образом результатов вполне подлежит экспериментальной проверке. Очевидно, возникают и новые проблемы. Весьма вероятно, что здесь мы сталкиваемся с довольно нестандартной ситуацией, когда необходимый математический аппарат создан или очерчен, но по ряду причин, в частности трудностей получения аналитических решений, математического моделирования, все еще трудно представить, как им в должной мере воспользоваться. В этом контексте четко спланированный, организованный и целенаправленный эксперимент, и полевой, и лабораторный, приобретает, быть может, определяющее значение.

Геосреда и энерговоздействия. Общие замечания. Коснемся теперь некоторых общих вопросов физики процесса формирования отклика геосреды на внешнее энерговоздействие [Тарасов и др., 1955; Тарасов, 1997; Авгимов и др., 2005; Мирзоев и др., 2009; Богомолов, 2012].

Как уже отмечалось, геосреда эволюционирует в пространстве и времени в соответствии с законами, общими для открытых, энергонасыщенных диссипативных систем. В зависимости от своего текущего состояния в развитии геодинамических процессов в ней наблюдается смена периодов самоорганизации и хаотизации, медленных режимов развития быстрыми или даже катастрофическими. При этом в зависимости от своего состояния эта самоорганизованная система обладает повышенной или пониженной чувствительностью к внешним энерговоздействиям. В итоге они могут давать самые разные результаты и прикладные попытки, их реализации могут быть самыми неожиданными, не всегда однозначными. Причиной этого, очевидно, является тот факт, что даже слабые изменения характера воздействия могут вызвать значительные отклонения от стационарного режима в условиях близости параметров системы к точке бифуркации. Нелинейность среды обусловливает взаимодействие физических полей как непосредственно, так и опо-

средствованно. Стохастический резонанс как фундаментальный пороговый эффект, реализующийся в нелинейных системах, — характерный пример индуцированных шумом переходов. Структура воздействующего сигнала, статистика шума и свойства конкретной системы определяют в конечном счете результат внешнего энерговоздействия.

Важно, что внешнее воздействие может быть не энергетически мощным, а соответственно топологически организованным, согласованным с текущим состоянием системы и уровнем шумов в ней. Разумеется, мощное силовое воздействие также дает некоторый эффект, но разрушает при этом внутреннюю согласованность и способность системы к самоорганизации, а зачастую, и саму эту систему в целом, что делает проблематичным его использование (подземные ядерные взрывы, например).

Как известно, судить о приближении бифуркации стационарного режима системы можно по нарастанию «мягких» (низкочастотных) мод в спектре ее шумов. Важно, что эта закономерность роста интенсивности «мягких» мод в окрестности точки бифуркации стационарного режима является универсальной [Руманов, 2013]. Однако трудности такой диагностики системы усугубляются сложностью, а зачастую, и практической невозможностью текущего слежения и влияния: существующие в настоящее время системы контроля и мониторинга геообъектов не обеспечивают оперативной обработки и получения необходимой информации о геодинамических изменениях в процессе воздействия, в режиме реального времени.

На какие же процессы в геосреде и каким образом влияют на них источники относительно слабых электромагнитных полей естественного и искусственного происхождения? Исходя из предложенной И. Л. Гуфельдом концепции динамически неустойчивой геосреды [Гуфельд, 2007], можно предположить, что в условиях земной коры конкуренцию и термическим, и нетепловым параметрам могут составить эффекты, вызванные внешними энерговоздействиями на параметры восходящих потоков легких газов (водород, гелий), которые, собственно говоря, и

вызывают быстрые и разномасштабные вариации ее объемно-напряженного состояния.

Новый взгляд на процессы взаимодействия среды и поля дает дробная динамика (fractional dynamics). Основой их описания в этом случае являются методы интегродифференцирования дробного порядка и дробного математического анализа. Они могут быть эффективно использованы в качестве математического аппарата описания промежуточных состояний в электродинамике сред, в частности получить новые решения уравнений Максвелла (дробные или промежуточные решения) [Тарасов, 2011].

Таким образом, решения уравнений электродинамики в средах отличаются исключительным разнообразием, что связано с разнообразием самих сред, находящихся в необычных нестандартных условиях. И, наконец, нельзя не сказать об эстетической привлекательности полученных результатов, их прикладном значении и роли в электродинамике геосреды.

Заключение. Как следует из приведенного изложения, геоэлектродинамика — развивающаяся отрасль современной геофизической науки, тесно связанная с быстроэволюционирующими представлениями о геосреде. Это относится и к фундаментальным ее аспектам, и, быть может, в еще большей степени к ее прикладным, в частности описанию отклика геосреды на внешнее энергетическое воздействие. Существенно, что геосреда приспосабливается в процессе энергообмена к внешнему силовому воздействию, самостоятельно изменяя свою структуру, в результате чего составные ее элементы могут консолидироваться в единое целое или даже разрушаться. При этом в зависимости от своего текущего состояния геосреда обладает повышенной или пониженной чувствительностью к возбуждающим факторам. Очевидно, адекватное описание такой сложной эволюционирующей в пространстве и времени системы, которая в зависимости от уровня иерархии своей организации проявляет свойства детерминированных, стохастических и сложных систем, является весьма непростой, если вообще разрешимой задачей.

Тем не мене сама по себе геоэлектродинамика обладает глубокими результатами и достаточно развитой аналитической базой. Однако основные из них существенно опираются на модели сплошных сред и использование математического аппарата, оперирующего главным образом с гладкими функциями пространства и времени. Иначе говоря, непрерывный континуум — это та реальность, которая обычно принимается большинством исследователей. Но эта реальность, возможно, также плод нашего вымысла. В итоге классические аналитические средства моделирования взаимодействия электромагнитных полей контролируемого и естественного происхождения с геосредой оказались малопригодными и неадекватными. И здесь мы сталкиваемся с необходимостью получения соотношений, которые дают более общую картину взаимодействия геосреды и поля. Особую актуальность приобретает электродинамика фрактальных сред. Фрактальные модели качественно меняют существо дела, в частности в описании волновых явлений, свойственных геосреде. Отчетливо проявляется необходимость смены «классической» электродинамической парадигмы на парадигму фрактальной электродинамики неустойчивой геосреды, тесно связанной с ее механикой, флюидодинамической и термодинамикой. Как известно, решения уравнений электродинамики в таких средах отличаются исключительным разнообразием и богатством форм, что связано с разнообразием самих сред, а электромагнитный отклик служит концентрированным источником информации об их структуре и свойствах. С этой точки зрения перспективы таких исследований представляются весьма важными и актуальными.

Когда информацию можно получить, посмотрев в интернете, создается ее избыток, способный препятствовать приобретению знаний, и оно перестает внушать уважение.

Г. Киссинджер

Высокочастотный спонтанный электромагнитный шум литосферы и томографические системы

Геофизический журнал,
№ 1, Т. 36, 2014, С. 43—63.

Введение. Как свидетельствует эксперимент, Земля, в частности ее литосфера, способны генерировать сейсмические и электромагнитные возмущения в широком диапазоне частот. Сейсмические явления, кроме крупномасштабных событий (сильная и средняя сейсмичность), включают слабую сейсмичность, а также непрерывный планетарный микросейсмический шум [Садовский, 2004; Гуфельд, 2007; Геншафт, 2009 и др.]. Поле микросейсмических колебаний (сейсмическое шумовое поле) характеризуется набором частот от сейсмоакустических (частоты более 1 кГц) до сейсмогравитационных колебаний планетарного масштаба (частоты менее 10^{-4}—10^{-5} Гц) [Адушкин, Спивак, 2012]. Сейсмоакустические шумы охватывают диапазон частот от кГц до сотых долей Гц. По частот-

ному составу они могут быть разделены на низкочастотные сейсмические (микросейсмы в диапазоне десятков Гц) и акустические (от десятков Гц до нескольких кГц).

Экспериментально установлено большое разнообразие электромагнитных возмущений, регистрируемых на земной поверхности или в приземной атмосфере в диапазоне частот от 10^{-4} до 10^{6} Гц и выше и дана их классификация [Левшенко, 1995; Сурков, 2000; Гульельми, 2007; Atmospheric…, 1997].

Существенно, что микросейсмическому и электромагнитному шуму в последние годы придается самостоятельное значение с точки зрения как изучения закономерностей их генерации и распространения, так и получения информации о свойствах геосреды, ее строении и развивающихся в ней динамических процессов [Николаев и др., 1986; Гуфельд, 2007; Геншафт, 2009; Чеботарева, 2011; Адушкин, Спивак, 2012; Шуман и др., 2012].

К настоящему времени стало понятно, что в широком смысле вопрос о природе сейсмоакустических и электромагнитных шумов литосферного происхождения является фундаментальным. Коснемся некоторых аспектов этой проблемы. Доминирует точка зрения, что геометрический шум (флуктуационно-диссипативный сейсмоакустический и спонтанный электромагнитный) — продукт своеобразного механизма эволюции перколяции внедрения (динамики проникающей перколяции) [Гийон и др., 1991; Зосимов, Лямшев, 1995]. При этом активизация геометрического шума является основным фактором (следствием) пространственно-временной дегазации, контролирующей сейсмотектонический процесс [Гуфельд, 2007, 2013б; Гуфельд идр., 2011].

Заметим, что проявление свойств перколяционного типа весьма вероятно в породах с низкой проницаемостью или в трещиноватых средах, а образование фрактальных агрегатов в таких системах резко увеличивает мощность создаваемого в них излучения [Гийон и др., 1991; Зосимов, Лямшев, 1995].

Как известно, просачивание флюидов и газов из низов литосферы имеет диффузионную природу, и поэтому реализуют-

ся условия для возникновения фрактального геометрического шума как естественного физического явления, не требующего специальных условий возникновения. При этом определяющее значение имеет известная флуктуационно-диссипативная теорема статистической физики, связывающей спонтанные флуктуации системы с ее диссипативными свойствами. Именно за счет такого баланса флуктуации в системе никогда не исчезают, а поддерживаются на уровне, диктуемом ее дискретностью [Зосимов, Лямшев, 1995]. С этой точки зрения распространяющиеся в геосреде фронты градиентной скалярной перколяции позволяют дать физическое толкование наблюдаемых параметров сейсмоакустического шума как неравновесного самоорганизованного критического явления, а ассоциируемый с этими фронтами диссипативный всплеск диэлектрической проницаемости при рассеянии на покоящихся или движущихся зарядах, содержащихся в геосреде или появляющихся в ней при этом процессе, в свою очередь формирует широкодиапазонный фрактальный спектр электромагнитного излучения [Шуман, 2013г].

Заметим, что с экспериментальной точки зрения фронты самоорганизованной критичности являются наиболее энергетически активными источниками излучений, а с термодинамической — это неравновесные фазовые переходы в открытых системах [Зосимов, Лямшев, 1995]. Соответственно, представляется безосновательным противопоставлять или разграничивать сейсмоакустическую и электромагнитную компоненты излучения. Разумеется, при этом роль начального возбуждения играет энергия низов литосферы (тепловой поток, обусловленный и диффузией легких газов — водород, гелий). Существенно, что энергия дегазации может быть переброшена вдоль шовных зон и глубинных разломов, быстро сконцентрирована и высвобождена со скоростью взрывной или даже детонирующей волны [Вол, Гилат, 2006].

Очевидно, в столь сложной ситуации идеи и принципы нелинейной динамики являются важным и эффективным направлением исследований таких систем. Случайность и хаос, возни-

кающие в них и проявляющиеся в хаотической колебательной структуре временных вариаций геофизических полей, — неотъемлемое свойство системы. Эти представления в совокупности с моделью геосреды в виде иерархической самоподобно структурированной фрактальной системы блоков оказываются ключевыми для понимания и истолкования вариаций геофизических полей, наблюдаемых в эксперименте [Лукк и др., 1996]. При этом фрактальные модели качественно меняют подходы к описанию этих явлений и дают, быть может, самое естественное их описание. Тем не менее вопрос о механизмах их генерации и распространения нельзя считать исчерпанным [Левшенко, 1995; Гульельми, 2007; Шуман, 2013г].

Как известно, общей теории описания диссипативных структур, возникающих в активных средах, не существует, и каждый достаточно глубоко исследованный случай такого рассмотрения дает примеры новых типов их динамики и самоорганизации, причем нет оснований думать, что эти рассмотренные примеры уникальны. Представляется также, что нет и всеобъемлющих моделей реальной геосреды, описываемых конечной системой дифференциальных уравнений.

Возможно, эти трудности в значительной степени усугубляются невозможностью переноса данных лабораторного моделирования процессов генерации на условия земной коры: на натурном и лабораторном масштабе они оказались существенно разными [Гуфельд, 2007; Гуфельд и др., 2011].

Заметим, что классические представления о генерации спонтанного сейсмоакустического электромагнитного шума существенно опираются на модели сплошной среды и используют математический аппарат, оперирующий, главным образом, с гладкими функциями пространства и времени (уравнение генерации Гульельми—Левшенко, оптимизационная модель Гершензона—Бамбакидиса и др.). Однако представления о геосреде как открытой системе с множеством самоорганизующихся структур в значительной степени лишает нас такой возможности. Очевидно, механика и электродинамика такой самоорганизующейся блочно-иерархической структуры оказывается со-

вершенно иной. Тем не менее, несмотря на некоторую неопределенность в трактовке геометрического шума литосферы, при диагностике ее структуры и динамики оказывается эффективным путь изучения сигналов, генерируемых этой системой, или изучения ее отклика на внешнее воздействие.

В частности, разработаны эффективные методы восстановления трехмерных изображений физических свойств и структурных особенностей геосреды методами трансмиссионной, дифракционной и эмиссионной томографии, использующие сейсмические, сейсмоакустические и, частично, электромагнитные волны, опираясь на расширенные представления о ее модели и свойства. Развиты и опробованы методы эмиссионной, сейсмической томографии, использующие информативность пространственно-когерентной составляющей шумового сейсмического поля [Николаев и др., 1997; Николаев, 2002; Чеботарева, 2010, 2011].

Тем не менее, в отличие от сейсмики, эти идеи и подходы не получили должного отражения и развития в геоэлектрике и все еще относятся к разряду экзотических, сфера применений которых и результаты весьма ограничены. Очевидно, здесь можно упомянуть лишь о методе томографии межскважинного пространства и некоторых модификациях георадарных зондирующих систем, относящихся к методам с контролируемым возбуждением поля. Выяснить причины такого положения дел, привлечь к проблеме внимание геофизиков, обозначить возможные пути ее решения с точки зрения адаптации классических подходов и неклассических приемов и является основной задачей данной публикации. При этом внимание будет концентрироваться на особенностях подходов, методах нелинейной диагностики структуры и динамики геосреды в шумовых спонтанных электромагнитных полях литосферного происхождения килогерцового диапазона, использование которых в этом аспекте еще сравнительно недавно казалось ограниченным и малоперспективным.

О концептуальных основах сейсмотомографии. Как известно, существуют два основных типа сейсмотомографии —

лучевая и дифракционная [Николаев и др., 1997; Николаев, 2002]. Применение той или иной ее модификации зависит от информации об исследуемом объекте. Если его размеры значительно превышают длину волны зондирующего сигнала, используют лучевую томографию, когда же характерные размеры неоднородностей сравнимы или меньше длины волны — дифракционную. Одно из преимуществ дифракционной томографии перед лучевой состоит в более полном использовании информации. Кроме того, нет необходимости выделения времен (моментов) прихода отдельных волн, так как запись колебаний обрабатывается целиком. Однако из-за трудностей в практическом использовании соответствующих процедур методы дифракционной томографии менее известны и менее используемы.

Лучевая сейсмическая томография основывается на определении скоростей распространения объемных и поверхностных волн и относится к методам направленного приема. Сфера ее применения — от глобальных, региональных сейсмических экспериментов, до локальных, в частности инженерно-геофизических исследований.

Очевидно, не будет преувеличением утверждать, что основу сейсмотомографии составляют лучевые методы и их обобщения. Можно сказать, что ее современные методы и модификации достаточно хорошо описывают те условия, при которых аппарат геометрической оптики оказывается адекватным физическим условиям эксперимента.

Как известно, метод геометрической оптики эффективен при нахождении волновых полей в условиях плавно-неоднородных и медленнонестационарных сред. Он существенно опирается на лучи, выполняющие роль каркаса, несущего волновое поле [Кравцов, Орлов, 1980].

Кратко напомним вывод основных уравнений для лучей на примере распространения скалярной монохроматической волны с частотой ω $u(\mathbf{R}, t)=u(\mathbf{R})\exp(-i\omega t)$ в среде с неоднородным в пространстве распределением фазовой скорости $V(\mathbf{R})$, где $\mathbf{R}=(\mathbf{r}, z)$, $\mathbf{r}=(x, y)$ [Абдуллаев, Заславский, 1991]. Как известно, ес-

ли характерный масштаб L изменения скорости волны $V(\mathbf{r}, z)$ значительно превосходит длину волны, т. е. $\lambda/L<<1$, то поле распространяющейся волны можно представить в виде

$$u(\mathbf{R}) = A(\mathbf{R})e^{iks(\mathbf{R})} \tag{1}$$

с медленно изменяющимися в пространстве амплитудой $A(\mathbf{r}, z)$ и фазовой функцией $S(\mathbf{r}, z)$, удовлетворяющих уравнениям

$$\left(\nabla S\right)^2 = n^2\left(\mathbf{r},z\right),\ \mathbf{n}\left(\mathbf{r},z\right) = \frac{V_0}{V\left(\mathbf{r},z\right)},\ \nabla\left(A^2\nabla S\right) = 0, \tag{2}$$

где $n(\mathbf{r}, z)$ — показатель преломления среды; $V(\mathbf{r}, z)$ — фазовая скорость; $k=2\pi/\lambda$ и V^0 — соответственно волновое число и скорость волны в однородной среде.

Первое уравнение в (2) — уравнение эйконала — нелинейное дифференциальное уравнение первого порядка. Оно обычно решается методом характеристических уравнений, вид которых можно записать в представлении Гамильтона. Вводя обобщенный импульс $\mathbf{p}=\nabla S$, уравнение эйконала (2) может быть представлено в виде

$$H = H\left(\mathbf{R},\mathbf{p}\right) = 0. \tag{3}$$

При этом вид функции $H(\mathbf{R}, \mathbf{p})$ определяется уравнением эйконала и зависит от выбора независимой переменной τ, функциями которой являются характеристические кривые $\mathbf{R}=\mathbf{R}(\tau)$ и $\mathbf{p}=\mathbf{p}(\tau)$. Вспомогательная переменная τ определяет уравнения луча в параметрической форме, которые, в свою очередь, находятся с помощью канонических уравнений Гамильтона:

$$\frac{d\mathbf{R}}{d\tau} = \frac{dH}{d\mathbf{p}},\ \frac{d\mathbf{p}}{d\tau} = -\frac{dH}{d\mathbf{R}},\ \frac{d\mathbf{S}}{d\tau} = \frac{\mathbf{p}dS}{d\mathbf{p}} \tag{4}$$

с функцией Гамильтона (3).

Проекцию характеристических кривых $\mathbf{R}=(\tau)$, $\mathbf{p}(\tau)$ на трехмерное конфигурационное пространство называют лучом. Однако границы применимости лучевого подхода в трехмерных задачах все еще недостаточно ясны или, быть может, недоста-

точно известны, несмотря на чрезвычайно широкое его использование в геометрической акустике или геометрической сейсмике.

В работе [Кравцов, Орлов, 1980] предпринята попытка ликвидации этого пробела на эвристической основе. В ней, опираясь на гюйгенсово-френелевскую картину формирования волнового поля, сформированы универсальные достаточные условия применимости метода геометрической оптики.

Напомним, что в соответствии с принципом Гюйгенса—Френеля формирование волнового поля в точке наблюдения происходит в результате интерференции вторичных волн, которые порождаются первичной волной в каждой точке фазового фронта. Определяющее значение имеет здесь первая зона Френеля, поскольку эти вторичные волны от первой зоны Френеля различаются между собой по фазе не более чем на π и поэтому не гасят друг друга.

Объем, ограниченный огибающей первых зон Френеля, называют френелевским. Он выделяет ту часть пространства, которую естественно считать областью локализации луча, рассматриваемого в качестве физического объекта. Иначе говоря, френелевский объем определяет область пространства, которая формирует волновое поле в рассматриваемой точке и составляет физическое содержание термина «луч» [Кравцов, Орлов, 1980]. Таким образом, в отличие от математического луча, физический луч имеет конечную толщину при конечных значениях длины волны λ. На этой основе формируются следующие эвристические критерии применимости геометрической оптики [Кравцов, Орлов, 1980].

Критерий 1. Параметры среды, а также волны (амплитуда и градиент фазы) не должны заметно изменяться в поперечном сечении френелевского объема (что предполагает выполнение некоторых неравенств).

Критерий 2. Разность фаз, соответствующая лучам, приходящих в одну и ту же точку, не должна быть меньше π (соответственно разность хода не должна быть меньше $\lambda/2$).

Иначе говоря, луч не должен проходить заметную долю сво-

его пути во френелевских объемах других лучей, приходящих в ту же точку.

Следует подчеркнуть универсальность и достаточность этих критериев, в том числе и в неоднородных средах. Существенно, что дифракционные по своему содержанию ограничения (критерии 1 и 2) выражены на лучевом языке, в результате чего, по мнению Ю. Кравцова и Ю. Орлова, геометрическая оптика приобретает внутренние критерии применимости.

Аналогично могут быть рассмотрены условия применимости пространственно-временной геометрической оптики, опираясь на пространственно-временной френелевский объем. Кроме того, сформированные критерии могут быть обобщены на векторные поля, наложив ограничения на малость изменения поляризации волны в поперечном сечении френелевского объема. Наглядность, универсальность, эффективность геометрической оптики для решения широкого спектра задач, в том числе сейсмических, — главные достоинства этой модели. С ней ассоциируется простая гидромагнитная модель распространения энергии, которая характеризуется вещественной скалярной функцией, являющейся решением уравнения эйконала.

Итак, классическая геометрическая оптика не может учесть дифракционных эффектов, так как обмена энергией между лучевыми трубками нет, поэтому за каким-либо препятствием образуется резко очерченная тень. Однако позже было показано, что геометрооптический подход может быть использован и за акустикой. Последнее обстоятельство связано с тем, что все соотношения геометрической оптики имеют смысл и в том случае, когда эйконал, амплитуда, координаты лучей и каустик становятся комплексными [Марков, Васильев, 1970; Тимофеев, 2005]. Но при этом проявляются качественные отличия «комплексной» геометрической оптики от обычной. В частности, комплексные лучи не удовлетворяют принципу Ферма, который утверждает, что лучу соответствует кривая, на которой эйконал экстремален.

Заметим, что в диэлектрической среде с потерями диэлектрическая проницаемость является комплексной величиной.

Следовательно, эйконал будет комплексным и в освещенной области. Возникают и другие проблемы. Прежде всего, само понятие скорости распространения электромагнитных возмущений в реальной поглощающей среде является приближенным. Возникает вопрос: что такое сигнал (переносчик информации) и какова его скорость? Импульс с голоморфной (аналитической) огибающей $F(0, t)$ не является сигналом в полном смысле этого слова, поскольку такой импульс бесконечен во времени и лишен элемента внезапности (фронта). Что же касается скорости распространения его максимума, то это — скорость внутреннего движения в импульсе, причем более или менее кратковременная. Передача информации с фазовой скоростью также невозможна по той же причине [Ванштейн, 1976]. Становится необходимым в общем случае введение понятий фазовой и групповой скорости, скорости распространения сигнала, энергии и фронта импульса (см. конкретизацию этих представлений применительно к геоэлектромагнитным приложениям в работе [Шуман, Савин, 2011]).

Другой подход к обобщению метода геометрической оптики на среды с поглощением, в известном смысле уточняющий и дополняющий предыдущий, предложен в работе [Худак, 1985], в которой получено описание класса всех решений системы уравнений Максвелла:

$$\mathrm{rot}\mathbf{E} = i\omega\mu\mathbf{H}\ ,\ \mathrm{rot}\mathbf{H} = -i\omega\mu\tilde{\varepsilon}\mathbf{E}\ ,$$

удовлетворяющих условию ортогональности

$$\mathbf{E}\cdot\mathbf{H} = 0\ , \qquad (6)$$

где $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ — комплексные амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей; $\mathbf{E}\cdot\mathbf{H}$ — скалярное симметричное произведение комплексных векторов; μ — магнитная проницаемость среды; $\tilde{\varepsilon} = (\varepsilon + i\sigma/\omega)$ — ее комплексная диэлектрическая проницаемость; σ — удельная проводимость; ω — круговая частота.

Показано, что условие ортогональности $\mathbf{E}\cdot\mathbf{H}=0$ необходимо и достаточно для существования таких комплекснозначных

функций φ_1 и φ_2, x_1, x_2 точки M (x, y, z) и частоты ω, для которых всякое решение системы уравнений Максвелла, удовлетворяющее (6), имеет вид

$$\mathbf{E} = \mathrm{grad}x_1 e^{i\omega\varphi_1}\,,\ \mathbf{H} = \mathrm{grad}x_2 e^{i\omega\varphi_2}\,. \qquad (7)$$

При этом фазовые функции ϕ_1 и ϕ_2 определяют структуру электромагнитного поля в том смысле, что если их считать заданными и гладкими функциями точки M (x, y, z), система уравнений (5) становится эквивалентной системе линейных алгебраических уравнений относительно векторов **E** и **H**:

$$\mathbf{k}_1 \times \mathbf{E} = \mu\mathbf{H}\,,\ \mathbf{k}_2 \times \mathbf{H} = -\tilde{\varepsilon}\mathbf{E}\,,\ \mathbf{k}_1 = \mathrm{grad}\varphi_1\,,\ \mathbf{k}_2 = \mathrm{grad}\varphi_2 \qquad (8)$$

где $\mathbf{k_1}\times\mathbf{E}$ и $\mathbf{k_2}\times$H — векторные произведения комплексных векторов.

Далее, для того, чтобы комплексные функции φ_1 и φ_2 были фазовыми для решений (7) при условии (6), необходимо, чтобы они удовлетворяли обобщенному уравнению эйконала:

$$\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{k}_2 = \mu\tilde{\varepsilon} = \mu\left(\varepsilon + i\sigma/\omega\right) \qquad (9)$$

Таким образом, в поглощающей среде, за исключением некоторых вырожденных случаев с определенной симметрией (плоская и сферическая волна), все лучи становятся комплексными. При $\mathbf{k}_1=\mathbf{k}_2=\mathbf{k}_1$, где **k** — вещественный волновой вектор, условие эйконала (5) превращается в классическое:

$$\left|\mathrm{grad}\varphi\right|^2 = \varepsilon\mu\,. \qquad (10)$$

В итоге решение задачи об изменении интенсивности и формы электромагнитных импульсов в среде с поглощением оказывается исключительно сложным. Иногда даже утверждается о принципиальной невозможности строгого ее решения, если учесть возможность частотной дисперсии параметров геосреды [Калинин и др., 2001].

Предыдущие выкладки касались в основном гармонического режима. Существует, однако, независимая теория апериодических электромагнитных возмущений, основанная на теории

линейных дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа, к классу которых относится и система уравнений Максвелла. Эта теория особенно эффективна в случае возмущений с явно выраженным фронтом. Установлено [Борн, Вольф, 1970], что фронты электромагнитных импульсов представляют собой волновые фронты с позиций геометрической оптики: они распространяются, отражаются, преломляются и дифрагируют в соответствии с принципом Ферма. Обычные лучи геометрической оптики оказываются частным случаем пространственно-временных лучей. Фронты импульсных возмущений этого типа, рассматриваемые как гиперповерхности в системе пространство—время, являются характеристиками уравнения эйконала.

Заметим, что теория гиперболических уравнений с присущим ей исследованием характеристик хорошо разработана и известна [Курант, 1964]. Простейший математический объект, с помощью которого можно описать взаимодействие среды и поля, — разрыв. Очевидно, разрывное описание волновых явлений существенно упрощает их понимание и интерпретацию [Гольдин, 1988].

Коснемся теории вопросов, связанных с эмиссионной сейсмической томографией. Как известно [Чеботарева, 2010, 2011], метод эмиссионной сейсмотомографии относится к классу методов направленного сейсмического приема. Его физической основой является тот факт, что в геосреде существуют области слабого шумоподобного сейсмоакустического излучения, активизирующиеся при низкочастотных деформационных природных и техногенных воздействиях. Эксперимент демонстрирует достаточно стабильную во времени картину пространственного распределения энергии сейсмоакустических шумов и подтверждает реальность задачи локализации их источников в исследуемом объеме геосреды. При этом в качестве источников эмиссии могут выступать не только активные, акустосейсмошумящие области или зоны, но и любые достаточно контрастные скоростные неоднородности, которые проявляются как яркие переизлучатели волновых процессов в геосреде.

Обычно рассматриваются несколько типов задач, решение которых основывается на применении принципов эмиссионной томографии:

– связанные с построением трехмерных моделей сейсмически шумящих объектов и контрастных неоднородностей;
– методы мониторинга сейсмических событий разного масштаба — метод 3D сейсморазведки (метод дифракционной томографии с управляемым внешним облучением).

Обработка данных обычно основана на суммировании сейсмических трасс вдоль годографов, рассчитанных для применяемой системы наблюдений в предположении известной скоростной модели разреза [Хогоев, Колесников, 2011].

С учетом двойственности природы микросейсмического поля, когда, с одной стороны, оно представлено интерференцией сейсмических волн различных типов, механизмы распространения которых известны, а с другой — интерпретируется в отдельно выбранной точке регистрации в качестве случайного процесса, развиты два основных подхода к его интерпретации. Один из них основывается на детерминированных свойствах микросейсмических волн, а другой (статистический) базируется на корреляции некоторых устойчивых статистических характеристик случайного микросейсмического поля с разномасштабными неоднородностями в исследуемом объеме геосреды [Горбатиков и др., 2008; Горбатиков, Степанова, 2008].

В последние годы на основе концепции геосреды как открытой нелинейной динамической системы предложены новые методы локализации объектов в ней по критерию степени упорядоченности акустосейсмических колебаний относительно фона, предложенные Ю. М. Климонтовичем в рамках теории открытых систем [Чеботарева, 2010, 2011]. Развиты и получили экспериментальную апробацию методы, использующие информативность пространственно-когерентной компоненты шумового сейсмического поля.

Число публикаций, посвященных этим вопросам, быстро растет, и было бы нереальным здесь ставить задачу о ретроспективном анализе и критическом обзоре развития томогра-

фических моделей и полученных результатов. Наша задача весьма частного и ограниченного характера — анализ возможностей использования метода применительно к электромагнитным зондирующим системам на основе спонтанного электромагнитного шума литосферного происхождения.

О точности локализации эмиссионных источников. Как свидетельствует эксперимент, геосреда (литосфера) достаточно «прозрачна» для распространяющихся в ней сейсмических волн, чтобы, с одной стороны, сохранить их пространственную когерентность и необходимую амплитуду, с другой стороны, пространственное распределение источников излучения является достаточно неравномерным. Разумеется, при распространении сейсмической волны в области со сложным строением и гетерогенной структурой происходит существенное искажение амплитуд и фаз регистрируемых сигналов вдоль волнового фронта, величина которого возрастает по мере увеличения длины луча и частоты колебаний. Однако, несмотря на обилие математических методов и алгоритмов в задачах вычислительной томографии, все еще мало известны или отсутствуют четкие представления о границах областей применимости лучевой томографии. Трудности их определения возможно связаны с тем, что точность локализации объектов зависит от многих факторов: кривизны фронта волны в среде, плотности пунктов регистрации, диаграммы направленности излучателя, спектров излучателя, других параметров.

Физический предел разрешимости метода лучевой томографии, как известно, сопоставим с размером первой зоны Френеля. В геометрическом приближении, типичном при рассмотрении этого вопроса, согласно классическому критерию Рэлея, пространственное разрешение определяется размером пятна в изображении точечного источника, на краю которого яркость (интенсивность) уменьшается на 60 %. Радиус этого пятна и выбирается в качестве оценки точности определения горизонтальных координат источника. Грубую оценку точности локализации можно получить также из оценки диаметра сечения сейсмического луча, определяемого на основе принципа

Гюйгенса—Френеля. В соответствии с этим принципом при заданной длине волны λ физический сейсмический луч ассоциируется с эллипсоидом с фокусами в конце луча длины L, оптимального в смысле принципа Ферма, с максимальным диаметром нормального сечения [Сейсмическая..., 1990]:

$$l_{\max} = \sqrt{\lambda L/2}\,.$$

Однако ввиду того, что длина L всех лучей внутри эллипсоидального объема различается не более чем на λ/4, то соответственно диаметр нормального сечения на концах оптимального луча будет l_0=λ/2. Обычно эту величину и выбирают в качестве оценки точности определения горизонтальной координаты глубинного источника и величины шага расстановки приемников вдоль профиля наблюдений. Размер такого «пятна» для лучей в диапазоне $0 \le L \le 2D$ имеет, согласно оценкам [Чеботарева, 2011], продольный l_{11} и поперечный l_1 размеры:

$$l \le l_{11} \le 2l\,,\ 0{,}4l \le l_1 \le 32l\,,$$

где D — апертура приемной группы, L — расстояние от центра группы до источника.

Разумеется, многочисленные преломленные и отражающие границы в неоднородной литосфере, возникающие вторичные волны неопределенной поляризации деформируют и изменяют направление волнового фронта. По этой причине вместо азимута на источник от прямых волн фактически определяется некоторый эффективный, кажущийся азимут, указывающий, возможно, на отражающие границы. Одновременное функционирование нескольких источников делает определение правильного азимута еще более сложным.

Очевидно, в рассматриваемом контексте при решении геотомографических задач можно надеяться на использование новых возможностей, вытекающих из неклассического описания геосреды. В частности, к их числу могут быть отнесены задачи реконструкции объемного распределения ее нелинейных и стохастических параметров, устойчивых статистических характеристик случайного микросейсмического поля. Эксперимен-

тально установлено [Горбатиков и др., 2008; Горбатиков, Степанова, 2008], что горизонтальное разрешение в этом случае может достигать величины 0,04 (!) от длины зондирующей волны.

Сосредоточим далее внимание на электромагнитной стороне проблемы. Сильное затухание электромагнитных возмущений, распространяющихся в литосфере (до 10^2—10^3 дБ/км) на частотах 10^4—10^6 Гц [Гохберг и др., 1985] принципиально меняет существо дела. В рассматриваемом частотном диапазоне спектра эмиссионных излучений мы находимся в диффузионной области, где, как уже упоминалось, обычные лучевые представления не работают. Даже при весьма умеренном с точки зрения геоэлектрических приложений поглощении лучевая кинематика должна быть дополнена комплексными лучами. В этом случае разрешающая способность низкочастотных электромагнитных полей существенно ограничена их гладким пространственным поведением. Достаточно грубая оценка возможности выделения аномального объекта состоит в следующем: разрешимая аномалия должна иметь размеры, сравнимые с расстоянием от нее до пункта наблюдений [Некут, Спис, 1989]. Заметим, что на относительно низких частотах (менее 100 кГц) удельная электропроводность большинства горных пород является действительной и частотнонезависимой величиной. На высоких частотах (более 1 МГц) мнимая компонента проводимости может оказаться достаточно большой и тогда возможно волновое, а не диффузионное распространение. Однако высокая скорость их затухания в проводящих средах сильно ограничивает область их геофизических приложений (межскважинное радиопросвечивание, радиолокационные методы). В итоге оказываются реализуемыми, с точки зрения томографического подхода, два возможных диапазона изменений. Во-первых, это СНЧ (ULF) возмущения с характерными частотами от мГц до Гц, источники которых могут находиться в земной коре на значительных глубинах, и, во-вторых, ОНЧ (VLF) диапазон с частотами от сотен Гц до первых МГц, источники которых находятся в поверхностных или близповерхностных ее слоях.

Как известно, помимо лучевого подхода и лучевой кинематики, дополненных волновым подходом и волновой кинематикой, возможен и третий, ориентированный на анализ распространения электромагнитных импульсов в поглощающих средах, который естественно назвать энергетическим [Ванштейн, 1976]. Однако он может быть реализован только в том случае и тех условиях, при которых можно воспользоваться выражением для плотности энергии в рассматриваемой среде. Тогда оказывается возможным введение понятия энергетической скорости распространяющихся в ней электромагнитных импульсов [Гинзбург, 1967; Ванштейн, 1976]. Естественность этого утверждения почти очевидна, поскольку само понятие скорости распространения электромагнитного возмущения в поглощаемой среде по своему смыслу является приближенным. Применительно к этим условиям Л. А. Ванштейном предложено определение времени прихода электромагнитного импульса в точку наблюдений по «центрам» импульсного потока энергии t_0 и энергетических потерь t_1 [Ванштейн, 1976].

Задача формулируется им следующим образом: при некотором $r>0$ наблюдается электромагнитный импульс, посланный из точки $r=0$. Этот импульс приносит с собой поток энергии F_r и выделяет в окрестности точки r мощность, пропорциональную P и имеющую импульсный характер. Вводя обозначения

$$t_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} tF_r dt \Big/ \int_{-\infty}^{+\infty} F_r dt ,$$

$$t_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} tPdt \Big/ \int_{-\infty}^{+\infty} Pdt ,$$

где t_0 — момент прихода центра импульсного потока энергии, t_1 — мощность потерь, и принимая во внимание соотношение, связывающее плотность энергии W, плотность потока энергии F_r и плотность мощности потерь

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial F_r}{\partial r} + P = 0 ,$$

находим

$$\frac{\partial t_0}{\partial r} = \frac{1 + \gamma\left(t_0 - t_1\right)}{V_e},$$

где

$$V_e = \int_{-\infty}^{+\infty} F_r dt \Big/ \int_{-\infty}^{+\infty} W dt,$$

$$\gamma = \int_{-\infty}^{+\infty} P dt \Big/ \int_{-\infty}^{+\infty} W dt.$$

Существенно, что при условии достаточно медленной модуляции по амплитуде V_e совпадает с определенной ранее Бриллюэном скоростью переноса энергии на несущей частоте:

$$V_e = \frac{F_r}{W},$$

а γ равно отношению P/W при $\omega=\omega_0$. При отсутствии затухания, вызванного потерями, V_e совпадает с групповой скоростью V_g [Вайнштейн, 1976].

Очевидно, приведенные равенства имеют значения эффективных кинематических характеристик электромагнитного процесса, интегрально отражающих влияние среды на пространственно-временную деформацию импульсов.

Напомним, что понятие групповой скорости четко определено только для волнового пакета, состоящего из элементарных монохроматических волн вида $E_0\exp[i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}-\omega t)]$ внутри достаточно узкой области спектра, т. е. только для специфической волновой формы (волнового пакета) и, вообще говоря, является приближенным, справедливым лишь в асимптотическом смысле.

В частности, в диссипативной среде удается ввести групповую скорость (вещественный вектор) как среднюю скорость перемещения области локализации финитных возмущений:

$$\left\langle \mathbf{V}_{\text{гр}} \right\rangle = \frac{\partial \operatorname{Re}(\omega)}{\partial \mathbf{k}},$$

а также скорость их расплывания (деформации)

$$\mathbf{V}_{\text{распл}} = \frac{\partial \operatorname{Im}(\omega)}{\partial \mathbf{k}}.$$

(В случае расплывания электромагнитных импульсов в диссипативных средах спектры частот $\omega(\mathbf{k})$, а следовательно, и $\mathbf{V}_{\text{гр}}$ являются комплексными. При этом в общем случае скорость $\mathbf{V}_{\text{гр}}$ не имеет энергетического смысла [Ванштейн, 1976; Кузелев, Рухадзе, 1979].)

Возможности «энергетического» подхода в теории электромагнитных зондирующих систем с контролируемыми источниками поля, работающими в импульсном режиме, уже анализировались в ряде работ (см., например, [Гроза, 1985; Шуман, Савин, 2011]). Что же касается применения метода к пассивным источникам, в частности шумовой компоненте электромагнитной эмиссии, то его перспективы не вполне понятны и до настоящего времени не обсуждались.

Таким образом, если говорить о возможностях переноса представлений и методов эмиссионной сейсмической томографии (с относительно слабым реформированием теории), то она в принципе существует, если работать в СНЧ или ОНЧ частотных диапазонах. Однако сильная неоднородная гетерогенная структура приповерхностных слоев земной коры приводит к сильному искажению амплитуд и фаз, регистрируемых на дневной поверхности сигналов вдоль распространяющихся фронтов, причем величина этих искажений возрастает с увеличением длины трассы распространения волны и росте частоты колебаний. Очевидно, весьма проблематично продвинуться на этом пути, не внося дополнительного понимания в происходящие в геосреде процессы и природу явлений, в частности электромагнитных. Возвратимся к этому вопросу несколько позже, а сейчас обратимся к другой, менее известной стороне проблемы, обычно остающейся, так сказать, «за кадром», а именно информационных возможностях шумовых полей с целью диагностики геосреды и происходящих в ней процессов.

Об информационных возможностях эмиссионного эксперимента. Предположим, что источник спонтанной электромаг-

нитной эмиссии (шумового поля) представляет собой набор независимых излучателей, генерирующих волны со случайной амплитудой, фазой и поляризацией, причем каждый элементарный излучатель (или объем) генерирует немонохроматические волны. Очевидно, результирующее поле, регистрируемое на поверхности геосреды сложным случайным образом, будет изменяться в пространстве и времени. Можно предположить, что в итоге все условия центральной предельной теоремы теории вероятностей будут выполненными. Тогда эти случайные электромагнитные поля будут принадлежать к классу нормальных, у которых все *n*-мерные распределения вероятностей являются гауссовыми.

Теоретические методы расчета свойств флуктуационных электромагнитных полей сводятся к решению задач математической физики на основе уравнений Максвелла в выбранной геометрии с заданными граничными условиями и применению флуктуационно-диссипативной теоремы [Виноградов, Дорофеев, 2009]. Тогда к описанию статистических характеристик флуктуационных полей оказывается применимой корреляционная теорема случайных процессов. Соответствующая теория электромагнитных флуктуаций была развита в середине прошлого века С. М. Рытовым [Рытов, 1966]. Соответствующие корреляционные функции удобно представить в симметризованном виде, в частности, для компонент магнитной индукции:

$$\gamma_{ij}\left(\mathbf{r},\mathbf{r}';t-t'\right)=\frac{1}{2}\left\langle B_i\left(\mathbf{r},t\right)B_j\left(\mathbf{r},t'\right)+B_j\left(\mathbf{r}',t'\right)B_i\left(\mathbf{r},t\right)\right\rangle,$$

где угловые скобки означают усреднение по ансамблю. Обычно используют разложение Фурье. Тогда фурье-образ корреляционной функции, согласно теореме Винера—Хинчина, представляет собой спектральную плотность флуктуаций:

$$\gamma_{ij}\left(\mathbf{r},\mathbf{r}',\omega\right)=\int\limits_{-\infty}^{+\infty}\gamma_{ij}\left(\mathbf{r},\mathbf{r}',\tau\right)e^{i\omega\tau}d\tau,$$

где интеграл понимается в смысле сходимости по вероятности или в среднем квадратичном [Виноградов, Дорофеев, 2009].

Согласно корреляционной теореме, для определения корреляционных функций компонент полей должны быть известны корреляционные функции токов в системе или функции Грина, которые задаются флуктуационно-диссипативной теоремой. Как известно, эта теорема связывает спонтанные флуктуации параметров системы с ее диссипативными свойствами. В частности, она связывает спектральную плотность флуктуаций сторонних токов (которые, вообще говоря, могут быть обусловлены и неэлектромагнитными процессами) с антиэрмитовой частью тензора диэлектрической проницаемости среды [Ильинский, Келдыш, 1989]:

$$\varepsilon_{ij}\left(\mathbf{r},\mathbf{r}',\omega\right)=\varepsilon'_{ij}\left(\mathbf{r},\mathbf{r}',\omega\right)+i\varepsilon''_{ij}\left(\mathbf{r},\mathbf{r}',\omega\right).$$

Важный вывод, следующий из теории С. М. Рытова, — в произвольной неоднородной среде корреляционная функция электромагнитных флуктуаций, создаваемых дельта-коррелированнными источниками и измеренных в двух пространственно-разнесенных точках, пропорциональна функции Грина, которая описывает процесс распространения волн (флуктуаций) между этими точками. В частном случае выполнения измерений вне среды в вакууме (воздухе) корреляционные функции удовлетворяют обычному волновому уравнению в вакууме, а их фурье-образы — уравнению Гельмгольца [Виноградов, Дорофеев, 2009].

Следовательно, статистическая информация о флуктуационных полях не теряется, поскольку достаточно анализировать динамику корреляционных функций. Связь корреляционных функций и функций Грина для конкретной краевой задачи означает, что эти функции в принципе содержат идентичную информацию о среде, которая, к примеру, может быть получена при размещении источника и приемника поля в точках $\mathbf{r}$, $\mathbf{r}'$. Это открывает дополнительные возможности исследования геосреды, работая в тех частотных диапазонах или с такими типами волн, для которых отсутствуют доступные естественные или контролируемые источники.

Как известно, для больших скоплений рассеивателей, образующих так называемые «мутные» среды, существенно много-

кратное рассеивание. В этом случае нашли применение следующие методы исследований: метод геометрической оптики, правильно описывающий лишь относительно слабые флуктуации амплитуды на ограниченных разносах (расстояниях); метод главных возмущений, учитывающий дифракционные эффекты, но лишь в области слабых флуктуаций; приближение параболического уравнения вместе с приближением марковского процесса, которое позволяет получить уравнения для произвольных моментов и описать поведение функции когерентности на произвольных расстояниях.

Заметим, что сейсмический эксперимент продемонстрировал стабильную во времени картину пространственного распределения энергии сейсмических шумов и возможность локализации их источников в исследуемом объеме геосреды [Чеботарева, 2011].

Томография спонтанной электромагнитной эмиссии. Как уже отмечалось, двойственность микросейсмического поля стала причиной разделения и разработки двух групп технологий диагностики геосреды: детерминированных, основанных на детерминированных его свойствах, и статистических, базирующихся на статистических параметрах. Эти методы и подходы не являются исчерпывающим решением проблемы, так как адекватное описание хаотических полей и процессов является весьма непростой, трудно разрешимой задачей. Так, до недавнего времени непериодичность в зависимости от времени и координат состояния, сплошной спектр мощности и спадающая во времени автокорреляционная функция однозначно связывались с представлениями о случайном процессе. Однако, как оказалось, подобными свойствами может обладать и процесс, порождаемый детерминированными законами: режимы функционирования детерминированных нелинейных систем со странными аттракторами обладают специфическими свойствами, совокупность которых включается в понятие детерминированного хаоса [Анищенко, 1997].

Далее, геосреда — хороший пример активной нелинейной неравновесной системы с множеством самоорганизующихся

структур [Лукк и др., 1996; Гуфельд, 2007; Геншафт, 2009]. Аккумуляция и передача больших порций энергии из низов литосферы сопровождается генерацией взаимодействующих сейсмоакустических, электромагнитных гидродинамических и тепловых возмущений, распространяющихся в ней. При этом диссипативные структуры, самоорганизующиеся в открытых системах, являются фрактальными [Зосимов, Лямшев, 1995]. Весьма вероятно, что и сейсмоакустический (геометрический) шум, и спонтанное электромагнитное излучение могут быть истолкованы в терминах автоколебаний — особого типа возмущений (волн), которые могут существовать в активных средах (автоволн), а понимание самоорганизации как перехода от хаотического к более упорядоченному состоянию — основа образования диссипативных структур (временных, пространственных и пространственно-временных) [Климонтович, 1999]. Существенно, что диссипация в этом случае играет конструктивную роль. Как известно, существует два типа сред, в которых происходит пространственно-временная самоорганизация: пассивная и активная. В пассивной среде процесс осуществляется за счет энергии локального источника, в активной — источник энергии делокализован и распределен по системе.

Общепринятым и наиболее адекватным математическим описанием активных (возбудимых) сред являются системы параболических уравнений типа «реакция—диффузия» [Давыдов и др., 1991]. Однако общей теории активных сред не существует. К настоящему времени известны разнообразные типы структур в однородных активных средах [Васильев и др., 1979; Кернер, Осипов, 1989; Давыдов и др., 1991; Елькин, 2006]:

– распространение уединенного фронта возбуждения;
– распространение импульса стабильной формы;
– автономные локализованные источники;
– стоячие волны;
– вращающиеся вихри (ревербератор);
– синхронные автоколебания в пространстве;
– диссипативные структуры — стационарные во времени неоднородные распределения в пространстве.

В неоднородных активных средах источником автоволн может быть некоторая область пространства, называемая пейсмейкером, в которой соответствующая частота колебаний выше, нежели в окружающей ее среде. Пейсмейкер создает в среде структуру в виде концентрических волн, расходящихся из некоторого центра. При этом в случае нескольких таких источников среда синхронизируется самым высокочастотным из них. Автоволны взаимодействуют между собой: выживает наиболее устойчивая и геометрически простая конфигурация со стоячими волнами. Иначе говоря, вся среда ведет себя подобно набору резонаторов.

Весьма значимую информацию о процессе эволюции автоволновой структуры можно получить, изучая только эволюцию во времени положения фронта волны [Давыдов и др., 1991], что позволяет понизить на единицу размерность задачи. Кинематический подход — весьма эффективное и универсальное средство для исследования эволюции различных автоволновых структур. Следуя работе [Давыдов и др., 1991], будем считать, что автоволна может быть описана путем задания ее ориентированной поверхности фронта. Как известно, всякая поверхность в трехмерном пространстве обладает в каждой своей точке двумя главными радиусами кривизны R_1 и R_2 (или двумя главными кривизнами $K_1=1/R_1$ и $K_2=1/R_2$). Показано, что скорость нормального смещения участка фронтальной поверхности зависит лишь от суммы главных кривизн, т. е. от удвоенной средней кривизны $2H=K_1+K_2$ согласно равенству

$$V = V_0 - 2DH ,$$

где D — коэффициент (матрица) диффузии, V_0 — скорость в однородной среде.

Заметим, что с формальной точки зрения как автоколебаний, так и автосолитонов — уединенных стационарных собственных состояний (автосостояний) системы в фазовом пространстве — являются аттракторы, характеризующиеся определенной областью или бассейном притяжения [Кернер, Осипов, 1989].

Проанализируем и сопоставим далее базовые свойства волновых и автоволновых процессов.

Классические линейные волны:

– генерация под действием кинетической компоненты энергии локального источника;
– уменьшение амплитуды и изменение формы по мере распространения;
– наличие интерференции при взаимодействии;
– отражение от препятствий и дифракция на их границах. Они хорошо распространяются в средах, в которых диссипация достаточно мала. В противном случае они быстро затухают;
– перенос энергии.

Автоволны:

– возникают под действием потенциальной компоненты энергии, распределенной в геосреде;
– форма, амплитуда и скорость распространения сохраняются и определяются локальными свойствами геосреды — активной системы;
– скорость распространения автоволнового фронта зависит от его кривизны;
– существует минимальный временной интервал между соседними импульсами (волнами) — время абсолютной рефрактерности, необходимое для восстановления свойств среды после прохождения импульса;
– отражение от препятствий отсутствует, при столкновении аннигилируют — из-за аннигиляции при встрече интерференция отсутствует, т. е. для них нет эффектов интерференции и отражения в обычном смысле, связанных с принципом суперпозиции;
– дифракция на границах препятствий сохраняется;

энергия автоволной не переносится, а высвобождается.

Таким образом, пожалуй, единственное свойство, объединяющее автоволны с линейными волнами, — это принцип Гюйгенса, позволяющий говорить о дифракции тех и других. Напомним, что дифракция (огибание волнами препятствий) в со-

временном понимании трактуется как отклонение при распространении волн от законов геометрической оптики [Тимофеев, 2005]. Дифракция, как известно, проявляется у волн любой природы.

В итоге интерферометрия как метод визуализации структуры и процессов в геосреде, основанной на явлении интерференции волн и измерении разностей фаз применительно к автоволновым процессам, оказывается неприменимой. Далее, поскольку принцип Гюйгенса—Френеля применительно к автоволновым процессам не работает, френелевский объем, составляющий физическое содержание луча, не определяется, хотя положение фронта автоволны в последующий момент времени может быть построено по принципу Гюйгенса.

Обратим также внимание на отличие автоволн в активных средах от уединенных волн (солитонов) в нелинейных консервативных средах. В бегущем импульсе имеется баланс между запасенной в системе энергией и ее диссипацией в нем (бегущем импульсе). Солитон же формируется в результате взаимного уравновешивания действия нелинейности и дисперсии в консервативной системе [Кернер, Осипов, 1989]. Свойствами аннигиляции солитоны не обладают. Высота солитонной волны пропорциональна ее скорости.

Отметим также возможность генерации спиральных (геликоидальных) автоволн — незатухающих низкочастотных колебаний, обусловленных наличием магнитного поля в среде распространения.

Таким образом, перенос идей и методов классической акустоэлектромагнитной томографии, существенно опирающихся на физически содержательное понятие луча, на спонтанное шумовое электромагнитное излучение весьма ограничен и проблематичен: в этом случае мы лишаемся понятия «лучевого каркаса», несущего обычное волновое поле. Понятно, что в случае автоволновых представлений наблюдается совершенно иная ситуация: нет картинки пересечения этих волн, автоволны обладают многими особенностями, делающими их резко отличными от обычных волн в консервативных системах. Они не со-

храняют и не переносят энергию (они ее высвобождают), но сохраняют форму и амплитуду [Давыдов и др., 1991; Елькин, 2006]. В то же время, как уже отмечалось, самоорганизация геосреды выражается в появлении в ней пространственно-временной масштабно-инвариантной структуры, выходящей за рамки какого-либо одного поля. На энергетических потоках в таких средах могут возникать автоволны с хорошо выраженными границами. Эти среды характеризуются не только наличием потоков вещества (или энергии между отдельными ее точками), но и достаточно сложным поведением ее отдельных элементов. При этом автоколебательный элемент не имеет стационарных состояний и совершает устойчивые автоколебания определенной формы, амплитуды и частоты следования. В итоге в геосреде возникают области, где автоволны в результате взаимодействия гасят друг друга и где наблюдается их установившийся режим. Отмечается большое разнообразие картин, наблюдаются спиральные и свитковые волны — прямое обобщение спиральной волны на трехмерные активные среды [Елькин, 2006]. Очевидно, эта пространственно-временная структура поля представляет собой отображение вещественно-энергетической и геометрической структуры объектов. Эта сложная и пестрая картина отображается, проецируется на дневную поверхность, формируя на ней некоторое пространственно-временное распределение интенсивности эмиссионного излучения. В итоге эта сформированная на дневной поверхности структура оказывается изоморфной структуре и динамике геосистем различных уровней и типов организации. Важно, что в этом случае не предусматривается использование какой-либо информации, к примеру, о скоростной модели геосреды; измерение волнового поля, в принципе, может выполняться последовательно в точках регистрации поля вдоль профиля или площади, а не площадной сейсмической группой. Однако, несмотря на простой характер этой конструкции, ее реализация сталкивается с известными трудностями в случае томографии спонтанного электромагнитного излучения. Во-первых, эта картина оказывается сильно зашумленной излучением ионосферно-

магнитосферной и атмосферной природы, а также источниками, находящимися в приповерхностных слоях земной коры (теоретически, в скин-слое на заданной частоте). Во-вторых, трудности связаны с особенностями регистрации электромагнитного излучения рассматриваемого нами килогерцового диапазона. Из-за несовершенства инструментальной базы до настоящего времени электромагнитное излучение в килогерцовом диапазоне регистрируется как интегральная интенсивность потока импульсов, при котором весьма затруднительно идентифицировать реальный вид высокочастотного сигнала, что существенно осложняет определение положения его источников.

Напомним, что к основным параметрам, характеризующим электромагнитную эмиссию, относятся:

– общее число импульсов за некоторый исследуемый промежуток времени;
– суммарная или интегральная эмиссия — число превышений сигналом эмиссии установленного уровня за исследуемый промежуток времени;
– интенсивность эмиссии — число превышений сигналом эмиссии установленного уровня в единицу времени;
– амплитуда эмиссии — максимальное значение сигнала в течение заданного промежутка времени;
– уровень сигналов эмиссии — среднее квадратичное сигнала в рассматриваемый промежуток времени.

На сегодняшний день разработаны и применяются несколько модификаций соответствующей аппаратуры. В частности, в ООО «Югнефтегазгеология» разработан специализированный измерительный комплекс «Астрогон» [Богданов и др., 2009]. На основе современной элементной базы и цифровой обработки данных удалось достичь высокой точности (±5 %) и большого динамического диапазона (0,055—15 нТл) измерений параметров геомагнитных флуктуаций в диапазоне частот 1,5—70 кГц (по уровню 3 дБ).

Необходимо отметить и известные преимущества измерения числа импульсов перед измерением их интенсивности (оги-

бающей), поскольку такой подход весьма чувствителен, как следует из наблюдений, к изменению количества (числа) излучателей в геосреде.

Как свидетельствует обширный полевой эксперимент, каждый тип структуры литосферы характеризуется особым характером спонтанного электромагнитного излучения, а пространственные аномалии числа импульсов (интенсивность эмиссии) на земной поверхности имеют упорядоченную структуру [Ларкина и др., 2001; Шуман, Богданов, 2008; Старостенко и др., 2009; Шуман, 2010г; Шуман и др., 2011, 2012].

Ясно, что классическая парадигма геосреды как пассивного континуума при развитии методов глубинной локализации излучателей при объяснении этой упорядоченной структуры имеет ограниченное применение, в то время как подходы, основанные на идеях нелинейной динамики, вообще говоря, дают ключи к ее расшифровке.

Как уже упоминалось, многочисленные работы последних лет показали возможность в распределенных возбудимых системах типа «реакция—диффузия» автоволн в виде локализованных стационарных и нестационарных импульсных возмущений, причем эти объекты способны существовать в достаточно широком классе активных (возбудимых) сред. Автоволны могут распространяться многократно вследствие процессов их накачки потенциальной энергией извне, хотя и существует минимальный временной интервал между соседними импульсами — время рефрактерности. Можно сказать, что они свойственны основным базовым моделям возбудимых сред, причем каждый их элемент, в частности геосреды, — некоторая ее область, называемая пейсмейкером или ведущим центром, — генерирует последовательность импульсов с разным интервалом следования. При наличии нескольких пейсмейкеров с разными периодами низкочастотные подавляются высокочастотными, что обусловлено взаимной аннигиляцией автоволн. Возможно формирование некоего установившегося режима.

Укажем также на неизбежность генерации автоволн в разломных зонах литосферы: неустойчивое скольжение в системе

блоков обладает всеми признаками автоколебаний [Кузьмин, 2012].

Процессы флюидопереноса в значительной степени также характеризуются и определяются автоволновой динамикой [Дмитриевский, 2008]. Другой важный источник автоволн — ревербератор (спиральная автоволна или автоволновой вихрь). Он образуется в результате разрыва фронта бегущей волны и является наиболее высокочастотным из них. Поэтому при его возникновении он навязывает ритм всей среде, подавляя, в частности, концентрические источники — пейсмейкеры. В отличие от волн, генерируемых пейсмейкером, последовательность импульсов в спиральной волне имеет фиксированный период, определенный свойствами самой среды [Елькин, 2006].

Еще большее разнообразие источников может возникать в трехмерной активной среде [Keener, 1988; Давыдов и др., 1991; Елькин, 2006]. Важный источник бегущих сферически расходящихся волн в неоднородной среде (пейсмейкер) — области, в которых собственная частота колебаний выше, чем в окружающем их пространстве. Прямым обобщением спиральной волны на 3D пространство является свиток. Вращающуюся на плоскости спиральную волну можно рассматривать в качестве плоского сечения некоторой цилиндрической поверхности — простейшей трехмерной автоволновой структуры. По своим свойствам такой вихрь аналогичен спиральной волне. Роль ядра здесь играет цилиндр, ось которого называют нитью свитка. Эта нить свитка может быть искривлена и, в частности, замкнута в окружность. В результате получается вихревое кольцо. Вихревое кольцо — локальный автоволновой источник. На больших расстояниях от своего центра оно создает сферически расходящиеся волны. Как правило, вихревое кольцо нестабильно. Оно может либо сжиматься, либо расширяться с течением времени. Существенно, что эволюцией вихревого кольца можно управлять с помощью периодической модуляции свойств активной среды. Заметим также, что развитый аппарат кинематического анализа автоволновых структур пригоден для изучения эволюции автоволн в неоднородных и одновременно нестационарных средах [Давыдов и др., 1991].

Таким образом, имеются весомые основания предположить, что источником спонтанной эмиссии может служить набор «независимых» излучателей, генерирующих концентрические автоволны или сферически расходящиеся волны. Другие типичные для этого случая структуры, в частности реверберато-ры, лишь зашумляют эту в общем-то прозрачную картину. Тогда по аналогии с гравимагниторазведкой в случае аномального объекта в форме шара приходим к следующему хорошо известному соотношению между размером аномалии L, регистрируемой на земной поверхности, и глубиной погружения H — центром генерации (в частности, пейсмейкера) H~0,71L.

Полевой эксперимент свидетельствует о конструктивном характере такого предположения [Богданов и др., 2009а; Старостенко и др., 2009; Дурандин, 2011; Шуман и др., 2012]. В итоге построение псевдоразрезов на основе такой глубинной привязки источников спонтанного излучения в литосфере может быть в первом приближении сведено к относительно простому анализу пространственного распределения его интенсивности на земной поверхности или над нею. Эксперимент свидетельствует о ее стабильном характере и на морских акваториях [Шуман и др., 2011]. Ясны и причины сложной мозаики, изрезанности, разорванности пространственной структуры интенсивности электромагнитного излучения, обусловленные, очевидно, наряду с источниками внелитосферного происхождения, разнообразием эмиссионных источников и взаимной аннигиляцией автоволн, генерируемых ими.

Нелинейности структурно-неоднородных сред и методы их диагностики. Изложение было бы неполным, если не затронуть еще один аспект проблемы, касающейся развития методов нелинейной диагностики геосреды. Как известно [Руденко, 2006], в рамках нелинейной акустики нелинейные упругие свойства конденсированных сред и нелинейные волны в них активно изучаются уже более полувека. Этот интерес связан с необычно большими нелинейностями многофазных дефектных и структурнонеоднородных сред, в том числе и геосреды.

Различают три типа нелинейности: геометрическую, физи-

ческую и структурную. При этом каждая из них может быть распределена во всем ее объеме или сосредоточена в локальной пространственной области, малой по сравнению с длиной волны [Руденко, 2006]. Причины, которые приводят к появлению больших (даже гигантских) нелинейностей в структурно-неоднородных средах, весьма разнообразны. В частности, это — наличие в них сильно сжимаемых включений (пузырьков газа или жидкости), трещиноватость среды и др. Как следует из теории самоорганизации, всякие открытые системы с сильной нелинейностью, как правило, пульсируют. Фундаментальная особенность поведения таких систем — периодичное чередование стадий эволюции и инволюции роста интенсивности процессов и их затухания, интеграции и дезинтеграции, неустойчивость к малым возмущениям. Помимо гигантской нелинейности структурно-неоднородные среды характеризуются также некоторыми другими свойствами, в частности, наличием «доминантной» частоты: вне зависимости от частоты возбуждения колебаний на выходе регистрируется «доминантный» отклик, в то время как другие спектральные составляющие, включая и частоту возбуждения, оказываются достаточно слабыми. Согласно работе [Руденко, 2006], причина такого явления во внутренних резонансных свойствах и сильной нелинейности, ответственной за перекачку энергии колебаний в эти частоты.

Перенос энергии колебаний в низкочастотную и высокочастотную области спектра означает, что принимаемый сигнал, прошедший сквозь реальную структурно-неоднородную среду, несет информацию об источнике и трассе своего распространения [Руденко, 2006]. В то время как линейные методы позволяют исследовать объекты, изменяя частоту, фазу, поляризацию и направление распространения волны, при использовании нелинейных явлений используется зависимость отклика среды от амплитуды (интенсивности) зондирующего сигнала. С ростом его амплитуды нарушается принцип суперпозиции: сильные возмущения взаимодействуют между собой и обмениваются энергией. При этом каждая из волн несет как информацию о характеристиках, взаимодействующих с ней, так и о параметрах среды распространения.

Заметим, что в распределенных системах характер колебаний (автоколебаний) существенно зависит от типа нелинейности и особенностей дисперсии ее физических свойств, а диссипация, быстро возрастающая с увеличением частоты или уменьшением пространственного масштаба возмущений, усугубляет ситуацию. В частности, эффекты объемных нелинейностей способны накапливаться при распространении возмущений, если затухание, дифракция, дисперсия достаточно слабы [Руденко, 2006].

Обратим внимание на один критически важный аспект проблемы — потери устойчивости установившегося режима активной распределенной системы (геосреды), у которой диссипация компенсируется внешней подпиткой и когда ее параметры близки к точке бифуркации стационарного режима. Согласно работе [Руманов, 2013], о приближении бифуркации стационарного режима (катастрофы) системы свидетельствует нарастание низкочастотных (мягких) мод в спектре ее шумов. Причем этот вывод о нарастании низкочастотных мод (шумов) в окрестности бифуркации стационарного режима (резонанса на нулевой частоте) является универсальным [Руманов, 2013]. В этом контексте создание сетей мониторинга за шумовой сейсмической и электромагнитной компонентой, создание устройств, информирующих о ее спектре, — одна из актуальных задач современной геофизики. Проблема, однако, состоит в том, что хотя устойчивое состояние системы несомненно существует, область притяжения (бассейн) аттрактора непрерывно изменяется. Это понижает «градус оптимизма» согласно статье [Руманов, 2013]. И здесь мы снова вынуждены «растекаться по старым следам», так как неясно, как в этом случае будет реализовываться процесс нарастания низкочастотных мод в спектре шумов исследуемой системы. Понятно, что только обширный полевой эксперимент поможет прояснить существо дела. В то же время формирование и развитие этого направления геофизической науки вполне объяснимо, своевременно и обоснованно. Важно, что на основании только экспериментальных данных (временных рядов наблюдений) этот критерий наряду с

расчетом таких характеристик, как показатели Ляпунова, энтропии и размерности, дает возможность определять горизонт прогноза рассматриваемого процесса и в ряде благоприятных случаев предсказывать дальнейшую эволюцию системы [Лоскутов, 2010].

Заключение. Важная в прикладном и фундаментальном аспекте проблема восстановления трехмерных изображений физических свойств и структурных характеристик геосреды методами трансмиссионной, дифракционной и эмиссионной томографии несомненно определяет одно из ведущих направлений современной геофизической науки. Становление томографии, как известно, тесно связано с решением обратной задачи Радона и исследованием некоторых задач интегральной геометрии. Современные методы томографии достаточно успешно описывают те условия, в которых аппарат геометрической оптики оказывается адекватным физике процесса. Однако все еще отсутствуют или, возможно, остаются в тени четкие представления о границах области применимости лучевого подхода к решению томографических задач. Далее, геометрическое приближение, как известно, неустойчиво по отношению к малым возмущениям начальных условий, параметров среды и границ раздела в ней. Следует также обратить внимание на то обстоятельство, что стандартные методы исследования лучевой динамики используют в той или иной форме идею разделения пространственных переменных, что также сужает диапазон возможностей теории.

Было бы нереальной задачей комментировать здесь широкий спектр высказанных по этому поводу мнений и точек зрения. Очевидно, весьма трудно продвинуться на этом пути, не внося дополнительного понимания о происходящих в геосреде процессах и природе явлений. Тем не менее профессиональные приемы и применяемый аппарат в ряде случаев продолжают довлеть над адекватностью подхода, в то время как эксперимент свидетельствует о его неуниверсальности. Применение методов исследования нелинейной динамики вносит "новое измерение" и новые возможности.

Основные предпосылки нового подхода — открытость, нелинейность, энергонасыщенность, кооперативное взаимодействие элементов геосреды на разных масштабных уровнях. Существенно, что эксперимент допускает автоволновую трактовку происходящих в геосреде процессов, типичность их хаотического поведения, демонстрирует стабильную во времени картину пространственного распределения энергии сейсмических, сейсмоакустических и электромагнитных шумов литосферного происхождения и возможность локализации их источников.

Известны различные источники автогенерации волн в активных средах. И это не математическая экзотика, а типичное свойство реальной геосреды. Экспериментально обнаружены и описаны характеристики эндогенной сейсмической и электромагнитной эмиссии, установлены теоретические предпосылки ее существования с точки зрения расширенной концепции геосреды как открытой неравновесной нелинейной системы с блочно-иерархической структурой. Развиты новые методы локализации объектов геосреды, в частности на основе критерия степени упорядоченности сейсмоакустических колебаний относительно фона. В русле этих идей и на сходной концептуальной основе могут быть предложены новые методы локализации источников спонтанного электромагнитного излучения. Их принципиальное отличие состоит в том, что информационным сигналом в этом случае служат не отраженные, преломленные или рассеянные волны, а спонтанная компонента электромагнитного шума литосферного происхождения. При этом, что существенно, исследуемый спектр находится в килогерцевой области частот. Однако достаточно сильное затухание электромагнитных волн этого диапазона в литосферной области долгое время являлось психологическим барьером, преодолению которого до настоящего времени не помогали даже очевидные сейчас многочисленные экспериментальные результаты по регистрации электромагнитной эмиссии, достаточно широко представленные в печати.

Заметим, что применение методов исследования нелинейных динамических систем для решения томографических задач

связано со значительными трудностями. В известной степени это оправдывает скептицизм некоторых авторов в решении данной задачи. Разумеется, наибольшее практическое значение при этом имеет исследование распределенных трехмерных активных сред, автоволновые процессы в которых несравненно сложнее и разнообразнее, нежели в одномерных. Но, как известно, важную и достаточно полную информацию о процессе эволюции автоволновой структуры можно получить, анализируя только изменение во времени положения фронта возмущения. На этой идее, значительно упрощающей рассмотрение автоволновых процессов, основаны кинематические подходы к их описанию. Понятна также ограниченность нелинейного подхода на базе фазовой плоскости и необходимость выхода с этой плоскости в пространство измерений большей размерности. Тем не менее полученные к настоящему времени на этой основе экспериментальные результаты в области томографии сейсмоакустической и спонтанной электромагнитной эмиссии дают повод для оптимизма при решении ряда прикладных задач по исследованию структуры и динамики геосреды. В этом контексте томографию спонтанной электромагнитной эмиссии литосферы можно рассматривать не только как метод локализации ее источников, но и в более расширенной постановке как общий подход к восстановлению архитектуры геосреды и прогнозу ее поведения путем анализа регистрируемых электромагнитных сигналов, порождаемых самой системой.

Работа выполнена в рамках научного проекта «Комплексное геофизическое изучение глубинного строения, состава и эволюции земной коры с целью определения углеводного ресурсного потенциала Азово-Черноморского региона» и целевой комплексной программы научных исследований НАН Украины «Комплексный мониторинг, оценка и прогнозирование динамики состояния морской среды и ресурсной базы Азово-Черноморского бассейна в условиях увеличивающейся антропогенной нагрузки и климатических изменений».

О прогнозе и прогнозируемости сейсмического процесса

Геофизический журнал,
№ 3, Т. 36, 2014, С. 48—71.

Введение. Сейсмичность, ее природа, безусловно, относятся к группе фундаментальных проблем и приоритетных направлений геофизики. К настоящему времени предложено множество моделей по физике и динамике очага землетрясений и сейсмического процесса в целом. В различных ракурсах, аспектах и подходах эти вопросы отражены в классических работах Джеффриса (1960), Гуттенберга (1963), Магницкого (1965), Стейси (1972), Буллена (1978), Цубои (1982). Новые подходы к анализу сейсмичности изложены в серии монографий Садовского, Писаренко (1991), Садовского (2004), Соболева (1993), Лука и др. (1996), Ребецкого (2007), Гуфельда (2007) и многих других авторов.

Принято считать, что сейсмичность своей причиной имеет гидродинамику — конвекцию в мантии, хотя ее структура из-за трудностей этой проблемы до настоящего времени не нашла подробного рассмотрения. Предполагается, что в Земле могут существовать диссипативные (или, возможно, почти диссипатив-

ные) структуры — трехмерные гидродинамические течения со сферической симметрией, в частности в жидком внешнем ядре, что, в конечном счете, и может быть источником движения литосферных плит и связанных с ним очагов землетрясений. При потоке газов из низов литосферы также возможно формирование различных структур за счет их радиальных и аксиальных потоков. При этом источник, мотор всей геодинамики — геотермический поток со средней мощностью порядка 90 мВт/м^2, что при интегрировании по всей поверхности Земли дает полную мощность около $4{,}5 \cdot 10^{13}$ Вт. К сожалению, наши возможности и методы исследования процессов в земных недрах, их моделирования, вычисления, имитации все еще достаточно скромны и находятся вблизи или за барьером их понимания. В итоге возникают мифические теории, на какое-то время способные объяснить имеющиеся результаты экспериментальных исследований, их некоторую совокупность или вообще не ставят такие задачи. Но, как известно, эксперимент сам по себе не обязательно прямо ведет к пониманию наблюдаемых явлений: основываясь только на эксперименте, зачастую весьма проблематично разделить причины и следствия наблюдаемых явлений.Характерная особенность сейсмического процесса в предельно энергонасыщенной геосреде — его неустойчивость. При этом и сейсмичность, и электромагнитная эмиссия обладают ярко выраженными свойствами нелинейных процессов, способностью к периодической самоорганизации и хаотизации, характерному поведению при приближении к землетрясению и после него.

Существует ряд базовых моделей подготовки очагов землетрясений. Отметим некоторые из них. Это модель лавинно-неустойчивого трещинообразования, дилатансно-диффузионная модель, модель консолидации Добровольского, модели неустойчивого скольжения, фазовых переходов и др. Применительно к конкретным условиям эти базовые модели усложнялись с перспективой превращения их в имитационные. Получил широкое развитие так называемый неоклассический подход к проблеме, который многими считается главным направ-

лением (мейнстримом) в исследованиях сейсмичности, основанный на идеях и методах нелинейной динамики, в частности теории самоорганизованной критичности (СОК). Эта парадигма — парадигма эволюции системы к критическому состоянию без привлечения каких-либо параметров, разработанная Баком, Тангом и Визенфельдом (модель БТВ) сразу же привлекла к себе повышенное внимание [Bak et al., 1987]. Достаточно обширные сейсмические данные (ряды наблюдений) в общих чертах подтверждают, что представление о самоорганизации сейсмического процесса, вообще говоря, согласуется с предсказуемостью сильных сейсмических событий и позволяют оценить применимость теории СОК к описанию процесса их формирования. Тем не менее, несмотря на то, что мы располагаем достаточно большим набором моделей, один из основных аспектов сейсмичности — возможность ее прогноза, особенно краткосрочного, общий подход к проблеме предсказуемости все еще не получили адекватного описания. Многие геофизики все еще пытаются обходить эти вопросы, считая их неудобными или некорректными.

Разумеется, построение сейсмической динамики, прежде всего феноменологической модели сейсмической активности, оказалось необычно сложной и пока не решенной задачей. Дискуссия о возможности прогноза опирается на представление о сейсмическом процессе как об эволюции блоков с самоподобной структурой. Наиболее универсальный и не подлежащий сомнению экспериментальный факт, относящийся к сейсмическому процессу, — установление разнообразных законов подобия, выполняющихся в широком диапазоне масштабов. К ним относится закон Гутенберга—Рихтера о сейсмической зависимости частоты повторяемости от энергетического класса землетрясения и закон Кнопова—Когана для распределения интервалов между событиями.

Традиционный путь решения прогнозных задач — анализ корреляционных связей между аномальным проявлением в физических полях и их пространственным распределением, механизмом и динамикой очагов сейсмических событий с привле-

чением различных критериев сейсмичности: геологических, тектонических, космических и др. Это анализ и обобщение результатов теоретических исследований взаимосвязей геофизических полей и сейсмического процесса, обработка статистических данных (рядов наблюдений), построение статистических зависимостей прогноза состояния геосреды, моделирование сейсмического процесса в сейсмогенерирующих зонах, обнаружение и систематизация вариаций геофизических полей в зонах активных разломов при меняющихся геологических условиях.

Своеобразие нынешнего этапа исследований — формирование взглядов на геосреду как открытую иерархическую неоднородную физически нелинейную систему, изменяющуюся во времени, активное проникновение к ее изучению идей и принципов нелинейной динамики. Получила значительное развитие сама теория динамических систем. В основных чертах построена теория бифуркаций динамических систем большой размерности, теория перехода от детерминированного их поведения к хаотическому, выполнены важные исследования по генерации и распространению нелинейных волн и локализованных состояний для ряда пространственно-распределенных систем [Кадомцев, 1994; Малинецкий, Курдюмов, 2001; Лоскутов, 2010].

С учетом этих результатов получен ряд интересных результатов о динамике геосистем и адекватную интерпретацию их поведения в терминах теории динамических систем. В частности, были обнаружены сложные пространственно-временные изменения параметров литосферы, происходящие на различных пространственных масштабах и в широком диапазоне частот. Установлено, что сама геосистема является иерархией подсистем, а протекающие в ней процессы носят кооперативный характер.

Основные свойства геосреды как динамической системы — диссипативность динамики, компенсация энергетических потерь за счет действия внешних источников, активность ее отдельных элементов (блоков различного ранга), является типичным для автоколебательных систем нелинейной динамики.

Эксперимент дает весомые основания для предположения об автоволновом характере деформационного процесса, развивающегося в системе блоков земной коры. При этом неустойчивое скольжение вдоль разломов в этой блочной системе также обладает признаками автоколебаний.

Тем не менее, несмотря на имеющийся широкий спектр моделей геосреды и происходящих в ней процессов, сама проблема прогноза и прогнозируемости сейсмического процесса весьма активно сопротивляется пониманию и весьма далека от решения [Шаповал, 2011; Страхов, Савин, 2013а—в; Шуман, 2013в].

Итак, почему же долгосрочные прогнозы сейсмической активности далеко не точны и почему не удаются краткосрочные [Keilis-Borok, 1994]? Помогут ли нам здесь бифуркации и заслуживает ли внимание дискуссия о принципиальной возможности (или невозможности) предсказания сейсмических событий? [Страхов, Савин, 2013 а—в]? Обосновано ли замечание И. Гуфельда «... о безысходности в представлениях о сейсмическом процессе» [Гуфельд, 2013а]?

Парадоксальным является даже отношение к одному и тому же событию — Великому японскому землетрясению 11 марта 2011г.:

– иллюстрацией действующей ситуации, по мнению [Гуфельд и др., 2011], является его пропуск, несмотря на то, что условия для его мониторинга были уникальными;

– по мнению автора работы [Сидорин, 2011], — это «выдающееся достижение Российской академии наук: успешный прогноз землетрясения в Японии 11 марта 2011 г.», выполненный А. А. Любушиным [Любушин, 2011б].

Заметим в этой связи, что, вообще говоря, прогноз необходим не в качестве «прогноза в принципе», а как прогноз к моменту времени, когда он еще имеет смысл. Вполне вероятно, что это обстоятельство является необходимым условием дальнейшего развития и «выживания» этого направления исследований, которое наталкивается на значительные трудности в изучении геосистем, связаны с их необычностью, сложностью, отсутствием понимания архитектуры и принципом к межсис-

темных, в частности, межблоковых взаимодействий. Понятно, что для этого, прежде всего, нужна новая теория.

Вторая опасность связана с тем, что фундаментальные теории в этой области исследований неизбежно оказываются все меньше интересными широкому кругу геофизиков. Так что же, сбывается прогноз одного из основателей квантовой механики Е. Вигнера [Хорган, 2001] о конце науки, причем конце скором? И тем не менее проблема не выглядит совершенно безнадежной. Пессимизм связан здесь, в основном, с имеющимся негативным опытом прогноза. Даже принимая эту точку зрения, вполне можно рассматривать отдельные аспекты этой проблемы: мы можем, в принципе, понять эти системы, даже если нельзя их предсказать.

Возможно, в наиболее концентрированной форме пессимизм в отношении состояния проблемы прогноза и перспектив ее решения присутствовал и доминировал на совещании «Оценка проектов по прогнозу землетрясений» (Лондон, 7—8 ноября 1996 г.) [Earthquake…, 1996]. Не вызывают энтузиазма и некоторые положения Решения Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений и оценке сейсмической опасности от 23 декабря 2012 г., краткие тезисы которого приведены в работе [Страхов, Савин, 2013а—в]. В частности, это замечание о вторичности, а иногда и вредности теории в попытках объяснения экспериментальных фактов, привлечением положений парапсихологии, таких как интуиция, телекинез, ясновидения и др. Очевидно, это уже совсем рядом или граничит с экстрасенсорикой. Тогда найдется ли здесь место надеждам и перспективам исследований сейсмичности как физического явления? Вероятно, следует признать, что если и существуют принципиально неустранимые причины непредсказуемости, то ни в коей мере не в характере и недостатках физической теории.

Как известно, нелинейная динамика, хотя и лишает нас иллюзии глобальной предсказуемости таких систем, как геосреда, тем не менее она, в принципе, позволяет установить, сколько переменных необходимо для ее описания и сколько необходимо для ее предсказания с учетом некоторого «горизонта про-

гноза» и каким должен быть эксперимент (мониторинг). Но если это так, то нельзя ли попытаться избежать хаоса там, где его можно и нужно избежать?

Еще в 70-х годах прошлого века, благодаря трудам В. Арнольда, А. Колмогорова, Я. Синая, С. Смайла, Ф. Такенса и ряда других авторов сформулировалось качественно новое представление о локальной неустойчивости поведения большинства сложных физических систем важнейшей роли хаотических и стохастических процессов, не допускающих предсказаний на достаточно длительный промежуток времени. Но, очевидно, находясь в рамках чисто математических подходов, терминов и понятий, в этом многообразии легко потерять ориентацию и чтобы выбраться, необходима четкая физическая постановка проблемы, сформулировать которую можно лишь на основе анализа основ теории и натурного эксперимента. Некоторым попыткам, отдельным фрагментам такого анализа, опираясь на ряд работ этого цикла последних лет, и посвятим дальнейшее изложения.

Геосреда и сейсмический процесс. Как результат обобщений многолетних экспериментальных исследований физических свойств горных пород в их широком петрофизическом и фациальном разнообразии, физических характеристик и термодинамических условий в 80-х годах прошлого века произошел перелом в понимании свойств геосреды как открытой диссипативной динамической системы, нелинейной, активной, энергетически насыщенной, с непрерывно изменяющимися параметрами. Она существует и эволюционирует в пространстве и времени, на много порядков больших, чем любые эксперименты [Николаев, 2002; Садовский, 2004; Гуфельд, 2007; Геншафт, 2009]. На эту открытую систему и процессы в ней действуют многочисленные внутренние и внешние источники, в том числе хаотические электромагнитные, сейсмоакустические шумы различной интенсивности и цветности. В ней постоянно идут необратимые диссипативные процессы (диффузия, химические реакции, фазовые переходы), существуют комплексы нелинейных взаимодействий между физическими полями,

структурами и подсистемами. Кластерная сущность организации ее конденсированной фазы обосновывает системный анализ структур и функционирование сложных эволюционирующих объектов, которые в зависимости от иерархического уровня своей организации проявляют свойства детерминированных, стохастических, хаотических и сложных систем. Причем последние характеризуются уникальностью, слабопредсказуемостью и негэнтропийностью, обладая свойствами физичности и моделируемости. При этом сама геосистема является иерархией подсистем, а протекающие в ней процессы имеют кооперативный (коллективный) характер.

Как показано в ряде работ, диссипативные твердотельные структуры, самоорганизующиеся в открытых системах рассматриваемого типа, формирующиеся в условиях диссипации, являются фрактальными. В геосреде происходит много явлений, которые требуют распространение фрактала на сложные структуры с более чем одним показателем скейлинга. Такие структуры могут характеризоваться спектром различных показателей. Фактически мультифракционность означает, что изучаемый объект (геосреда) состоит из компонент или частей, каждый из которых обладает своими свойствами самоподобия.

Характерные признаки фрактальных структур — самоподобие, масштабная инвариантность, структурная иерархия, фрактальная размерность. Существенно, что многие сигналы, регистрируемые в экспериментах, которые генерируются геосредой, также являются мультифрактальными. При этом такие мультифрактальные процессы тоже допускают разложение на интервалы с различными локальными свойствами скейлинга. Иначе говоря, спектр мультифрактальных процессов не может быть описан степенным законом с одним показателем [Павлов, Анищенко, 2007].

Заметим также, что фрактальные системы, как правило, обладают более высокими удельными излучательными параметрами, чем континуальные среды.

Как известно, один из наиболее содержательных подходов к фрактальному анализу процессов опирается на предположение

о том, что процесс порождается динамической системой конечной размерности с хаотическим поведением [Зосимов, Лямшев, 1995]. Понятие фрактала тесно связано с хаосом в динамической системе, причем образ хаоса в фазовом пространстве системы — странный аттрактор — представляет собой фрактал.

У открытых систем с диссипацией фазовое пространство можно упрощенно представить разделенным на области притяжения к различным аттракторам [Фрадков, Кадомцев, 1994]. Как известно, при переходе к изучению все более сложных систем именно структурные, информационные аспекты их поведения и развития выступают на первый план, а динамика создает лишь основу для такого развития [Кадомцев, 1994]. В ней происходят взаимосвязанные процессы с различными характерными временами, и хаос на одних временах и уровнях самоорганизации обеспечивает упорядоченность на других, причем самоорганизация осуществляется в условиях открытой неравновесной структуры, какой является консолидированная земная кора с включением флюидных систем [Кисин, 2007; Гуфельд, 2007].

Глубинный флюид представляет собой сложную открытую, энергетически концентрированную динамическую систему, постоянно меняющую свои состав и свойства.

Проявление колебательных движений в геосреде — одна из форм диссипации энергии. Их спектр характеризует меру энергонасыщенности системы. Наблюдаемые вариации геофизических полей могут интерпретироваться как проявление детерминированного хаоса в иерархически структурированной фрактальной среде.

В последние годы предложены методики, позволяющие выяснить, произведен ли регистрируемый сигнал динамической системой, а также получить информацию о свойствах и характеристиках этой системы. В частности, мерой хаотичности могут служить показатели Ляпунова: если имеются положительные показатели, то поведение динамической системы будет хаотическим [Лоскутов, 2010].

Далее, геосреда — это энергопревращающаяся система: в

ней происходит трансформация энергии механической в электромагнитную и сейсмоакустическую, термической в механическую и др.

В рассматриваемом контексте обратим внимание на две важные теоремы. Первая, флуктуационно-диссипативная, связывающая спонтанные флуктуации системы с ее диссипативными свойствами [Ильинский, Келдыш, 1989]. Вторая, *S*-теорема Климонтовича (аналог Н-теоремы Больцмана для открытых систем) — закон уменьшения энтропии Климонтовича [Климонтович, 1999]. По существу, это принцип максимальной диссипации: система без структур может диссипировать такое количество энергии, которое задается микроскопическими процессами диссипации. Если же система со структурой обладает большей диссипацией, то такая структура возникает спонтанно.

Очевидно, при изучении такой сложной динамической системы обычный подход, заключающийся в аналитическом вычислении индивидуальных траекторий дифференциальных уравнений, не работает. Представляется, что всеобъемлющих моделей реальной геосреды, описываемой конечной системой дифференциальных уравнений, просто не существует и, более того, никакая простая модель эту систему — реальную геосреду — полностью никогда не опишет. Поэтому при изучении таких систем используется качественная теория, когда задачей теории является исследование вопросов устойчивости, роли инвариантных многообразий (характеристик), анализ геометрической структуры траекторий, поиск инвариантных мер. Поэтому в полной мере описание динамики рассматриваемых хаотических систем представляет, вообще говоря, практически неразрешимую сейчас задачу [Лоскутов, 2010].

Но, к сожалению, именно в этой ситуации мы сталкиваемся с проблемой построения адекватной феноменологической модели сейсмического процесса. И не удивительно, что достаточно полные модели глобального сейсмического процесса отсутствуют (seismologu is still in pre-equation state) [Keilis-Borok, 1994].

Проблемными остаются внутриплитовые землетрясения,

природа слабой сейсмичности и микросейсмического шума [Гуфельд, 2007, 2011]. Поэтому задача описания сейсмической динамики оказывается необычно трудной. С этой точки зрения кажется привлекательной попытка построения, прежде всего, феноменологической модели сейсмической активности. Но, высказав, казалось бы, столь привлекательную идею, авторы ограничились лишь построением некоторых частных корреляций, характеризующих сейсмическую активность [Фридман и др., 2010]. Они отмечают, по крайней мере, два класса динамических факторов, определяющих ее динамику в крупных тектонических структурах — глобальный, медленно меняющийся, и локальный, быстро меняющийся. Интерес представляет также обнаруженный или «спокойный» период сейсмической активности, связанной с проведением подземных ядерных взрывов в период с 1957 по 1964 гг., в течение которого можно говорить об изменении ее характера в глобальном масштабе.

В. Каган предпринял попытку определения сейсмичности как «турбулентности в земной коре» [Kagan, 1994]. Но насколько удачно такое сравнение? Как известно, исследование турбулентности в ее классическом смысле — одна из наиболее сложных, запутанных глав в истории физики. Согласно почти что общепринятым представлениям, турбулентность является процессом хаотическим и в этом смысле такое сравнение неудачно. Однако существуют и иные точки зрения на это явление. Достаточно упомянуть в этой связи подход Колмолгорова, математической предпосылкой которого является масштабная инвариантность (скейлинг) уравнений Навье—Стокса относительно замены длины, времени и скорости, и новый взгляд на явление турбулентности, очевидно высказанный впервые И. Р. Пригожиным (1986), согласно которому переход от ламинарного течения к турбулентному является процессом самоорганизации. Разработана феноменологическая макроскопическая модель стационарно-неравновесной трехмерной турбулентности в сжимаемой жидкости с учетом происходящих в ней нелинейных кооперативных процессов [Колесниченко, 2003]. Разумеется, земная кора (геосреда) не напоминает сжимаемую жид-

кость. Однако феномен турбулентности явно дает повод к размышлениям и исходные предпосылки для разработки и развития новых идей, касающихся порядка и хаоса, простоты и сложности в поведении открытых нелинейных систем весьма общей природы, которые могут без специфического воздействия извне путем самоорганизации образовывать макроскопические пространственно-временные структуры (осуществлять порядок вдали от равновесия и порядок через флуктуации) [Колесниченко, 2003]. И хотя со времени установления и понимания синергетической природы турбулентности как процесса самоорганизации прошло уже более 30 лет, однако эти новые представления все еще не материализовались в соответствующие разработки подходов, ориентированных на инженерный расчет, не говоря уже об их распространении на макроскопическое описание геосреды, тем более на попытку формулировки замкнутой системы уравнений, описывающих сейсмический процесс. Тем не менее, парадигма самоорганизованной критичности — эволюции системы к критическому состоянию — из-за своей фундаментальности оказалась весьма востребованной.

Как известно, суть самоорганизованной критичности состоит в том, что по мере эволюции нелинейной системы она неизбежно приближается к точке бифуркации, ее устойчивость резко падает и в ней создаются условия, при которых слабое внешнее воздействие может спровоцировать лавину в непредсказуемом месте и с непредсказуемыми последствиями. Тем не менее предполагают, что процесс подготовки сейсмического события порождается типичной системой с самоорганизованной критичностью [Шаповал, 2011].

Очевидно, в основе такого подхода лежит представление о наличии общих, универсальных свойств открытых сложных систем, откуда, возможно, следует универсальность алгоритмов прогноза поведения динамической системы. Развитие и адаптация соответствующих алгоритмов были осуществлены в Международном институте математической геофизики и теории прогноза землетрясений под руководством академика В. И. Кей-

лиса-Борока. В частности, был создан алгоритм прогноза, основанный на накопленных за многие годы наблюдений данных о сейсмической активности — алгоритм M8, предназначенный для прогноза сильных (более 8 баллов) землетрясений. Предприняты попытки его усовершенствования и модификации [Шаповал, 2011]. Сделан вывод о возможности эффективного прогноза в системе с самоорганизованной критичностью, что, очевидно, подтверждает тот вывод, что самоорганизация сейсмического процесса, вообще говоря, согласуется с предсказуемостью сильных сейсмических событий.

Однако результаты опробования этого алгоритма, полученные с 1985 г., оказались не очень успешными так же, как и при попытках прогноза сейсмических событий меньшей балльности. Это обстоятельство наряду с сравнительным анализом предсказуемости в различных моделях сейсмичности послужило дополнительным аргументом в пользу гипотезы о непрогнозируемости систем с саморганизованной критичностью [Perke, Carlson, 1994].

В итоге сталкиваемся с трудным выбором: либо считать сомнительным тезис о самоорганизации сейсмического процесса и предположение о том, что процесс подготовки сейсмического события порождается типичной системой с самоорганизованной критичностью, либо существенно модифицировать гипотезу о непредсказуемости этих систем. Ввиду актуальности проблемы рассмотрим ее более подробно.

Самоорганизованная критичность и прогноз разрушения нагруженных твердых тел. Как известно, первые представления о сейсмическом процессе, относящиеся к началу прошлого века, всецело основывались на представлениях физики и механики разрушения монолитных образцов горных пород. К концу прошлого века стала очевидной необходимость создания новой парадигмы для решения этого вопроса, базирующейся на физических закономерностях хрупкого разрушения, возникающего в массивах горных пород [Страхов, 1989]. В настоящее время при численном моделировании напряжений и деформаций крупных тектонических объектов обычно используется те-

ло Кулона—Мора для горных пород в хрупкой части литосферы и тело с нелинейной ползучестью для горных пород в подкоровой литосфере. При этом выбор количественных значений механических параметров для хрупкой части земной коры осуществлялся на основе экспериментальных наблюдений по разрушению малых образцов горных пород, на гипотезе сухой коры или гидростатическом законе распределении флюида по глубине. На протяжении длительного времени описание процесса разрушения твердых тел и пластической деформации развивалось в рамках линейных приближений механики сплошной среды на макромасштабном уровне и физики деформационных дефектов в нагруженном твердом теле (микромасштабный уровень) [Панин и др., 2012]. Однако в последние годы стало очевидным, что, вообще говоря, разрушение твердого тела является диссипативным процессом. При этом деформируемое твердое тело представляет собой многоуровневую иерархически организованную систему, описание которой должно осуществляться в рамках нелинейной механики и неравновесной динамики [Панин и др., 2012]. Было установлено, что любое разрушение твердых тел (и хрупких, и пластических), как и сам сейсмический процесс, является результатом эволюции многомасштабной иерархически организованной нелинейной динамической системы [Макаров, 2011].

Ведущая роль дефектов земной коры как физических механизмов неупругого деформирования и разрушения, происходящих на всем спектре пространственных масштабов, является фундаментом нового научного направления в изучении процессов разрушения образцов горных пород, как и явлений, наблюдаемых в сейсмоактивных зонах физической мезомеханики [Пантелеев и др., 2013]. При этом, как известно, базовыми фундаментальными идеями и физической мезомеханики, и нелинейной динамики являются идеи иерархичности и многомасштабности деформационных процессов.

К сожалению, ключевые проблемы многоуровневой самоорганизации и учета нелинейности иерархически организованной геосистемы весьма слабо разработаны и весьма фрагмен-

тарны. Тем не менее в русле этих идей и концепций получен ряд важных результатов. В частности, рассмотрение деформируемого тела как нелинейной многоуровневой системы позволило конкретизировать механизмы формирования локальных зон сильнонеравновесных состояний, в которых реализуются процессы зарождения деформационных дефектов различного масштабного уровня. При этом пластические сдвиги зарождаются в планарных сильно возбужденных подсистемах в виде нелинейных волн канализируемых локальных структурных превращений [Панин и др., 2012].

Особое место в ряду деформационных явлений занимают деформационные фронты, разнообразные волны повреждений и разрушения [Макаров, 2011]. В рамках этих представлений имеются весомые основания утверждать, что в процесс формирования очага разрушения вносят именно деформационные фронты. При этом начало интенсивной подпитки локальной области деформационными фронтами, очевидно, можно считать режимом обострения и переходом разрушения в катастрофическую стадию. Сам процесс разрушения твердого тела представляет собой последовательность катастроф во всей иерархии масштабов вплоть до макроскопического масштаба образца [Макаров, 2011].

Заметим, что и имеющиеся численные решения демонстрируют наличие двух стадий эволюционного процесса рассматриваемого типа — квазистационарной (сравнительно медленного накопления изменений в нелинейной динамической системе) и катастрофического сверхбыстрого этапа, когда события в системе развиваются в режиме с обострением. Возможна активация разлома деформационным фронтом, распространяющимся вдоль разлома.

В русле этих идей предприняты попытки построения модели подготовки возможного очага разрушения как результата эволюции дефектов геосреды на различных масштабных уровнях. При этом, как и в известной модели лавинно-неустойчивого трещинообразования, возможный очаг не связан с уже существующим разломом, а формируется благодаря коллективному поведению ансамбля дефектов [Пантелеев и др., 2013].

Если же создать условия каналированного распространения трещины (разрыва) и максимально локализовать эффекты диссипации, то этот разрыв будет распространяться как нелинейный волновой процесс [Панин и др., 2012].

Отметим некоторые результаты актуальных с точки зрения понимания эволюции деформируемых твердых тел, полученные в рамках этих теорий, важные с точки зрения приложений. Во-первых, это вывод о том, что все твердые тела (хрупкие и пластичные, в том числе и геосреды) являются динамическими нелинейными системами, обладающими свойством самоорганизованной критичности [Макаров, 2011; Панин и др., 2012]. Традиционный подход феноменологической макроскопической механики разрушения, основанный на макроскопическом масштабе усредненного описания, в принципе не может решить проблему прогноза разрушения, так как твердые тела и геосреды являются многомасштабными системами.

Имеющиеся численные решения свидетельствуют о двух стадиях эволюционного процесса — квазистационарной и катастрофического этапа эволюции, когда события развиваются в режиме с обострением. Фундаментальным свойством эволюции является наличие зон затишья перед катастрофическими событиями. Любое макроскопическое разрушение (катастрофический этап эволюции) является режимом с обострением на соответствующем масштабе. Физически этот режим свидетельствует о переходе разрушения с меньших масштабов на большие [Макаров, 2011]. Начало интенсивной подпитки некоторой локальной области деформационными фронтами предложено считать началом режима обострения. В итоге наличие локальных зон затишья и формирование локализованных диссипативных структур обострения можно считать предвестниками активной стадии формирования очага разрушения, что, по мнению авторов, вселяет определенный оптимизм в проблему прогноза. При этом математическая модель подготовки потенциального очага разрушения, по мнению [Пантелеев и др., 2013], соответствует требованиям новой парадигмы и, по существу, является формализованным обобщением модели ла-

винно неустойчивого трещинообразования [Добровольский, 2009].

Переход к стадии катастрофического роста дефектов имеет резонансную природу и определяется относительно слабыми флуктуациями поля напряжений [Пантелеев и др., 2013].

Тем не менее в рассмотренных моделях все еще остается существенной «лабораторная» компонента представлений о формировании очага. В частности, в них не рассматривается и не конкретизируется физическая природа движущих сил (речь идет лишь о силах тектонической природы), природа слабой сейсмичности, цикличность крупномасштабных разрывов в земной коре и их воспроизводство (повторяемость) в одних и тех же местах граничных структур, на что справедливо обратил внимание И. Гуфельд [Гуфельд, 2007; Гуфельд и др., 2011]. По его мнению, процессы подготовки очагов сильных сейсмических событий вообще не обусловлены процессами трещинообразования, взаимодействия трещин различного ранга, а обусловлены и связаны особенностями взаимодействия блоков. При этом под очагом сильного сейсмического события понимается связанное состояние нескольких блоков, ограничивающее их взаимное перемещение.

Разумеется, распространение магистрального разрыва может рассматриваться как нелинейный волновой процесс [Панин и др., 2012] в верхних горизонтах земной коры. Однако необходимо принимать во внимание факторы, определяющие процессы на глубинах более 30—50 км, где, вообще говоря, и формируется значительная часть наиболее сильных очагов землетрясений. Очевидно, в этом случае становятся определяющими не процессы взаимодействия трещин различного масштаба, а процессы взаимодействия блоков [Гуфельд, 2007; Гуфельд и др., 2011; Шерман, 2005]. В этом случае крупномасштабные разрывы реализуются в граничных (межблоковых) структурах, играющих, возможно, определяющую роль в тектоническом процессе.

Предсказуемость и самоорганизованная критичность. Как известно, степенные распределения и автомодельные свойства

сейсмичности типичны для систем, находящихся в критическом состоянии, откуда и делается вывод о том, что процесс подготовки события порождается системой с самоорганизованной критичностью. В частности, А. Шаповал утверждает, что в рамках типичных систем с самоорганизованной критичностью существует и может быть реализована модель сейсмического процесса, «… крупные события которой эффективно прогнозируемы с помощью адаптивных предвестников сильных землетрясений» [Шаповал, 2011]. И далее, что существенно, «…эффективный прогноз землетрясений в реальном времени не противоречит самоорганизованной критичности сейсмического процесса». При этом отмечается, что прогнозируемость построенной таким образом системы оказывается неоднородной во времени. В итоге качество прогноза, вообще говоря, без адаптивной коррекции алгоритмов существенно ухудшается.

Таким образом, здесь сталкиваемся с попыткой улучшения прогнозируемости с помощью построения универсальных предвестников, опирающихся на свойства модельной динамики. Однако далее следует весьма спорный неожиданный тезис: «… подтверждена универсальность методологии прогноза крупных землетрясений анализом последовательности крупных падений наиболее значимых финансовых индексов» [Шаповал, 2011]. Заметим в этой связи, что мы имеем много примеров самоорганизации, но в очень редких случаях разработаны математические модели этих процессов. Однако существует не так много аргументов, что эти модели и теории как-то непосредственно и очевидно связаны с физикой процесса в реальной геосреде.

Обратим внимание также на то обстоятельство, что А. Шаповал в качестве модели подготовки рассматривает «модель песка» (sand-pile), при этом правила эволюции модели интерпретируются в терминах сейсмического процесса в надежде на то, что наблюдаемая в конечном счете динамика будет иметь общие черты с реальностью. Разумеется, «куча песка» может рассматриваться в качестве сложной динамической системы, но многие конструкции, построенные «на песке», как известно,

весьма неустойчивы. Да и сами «кучи песка» ведут себя совершенно по-разному в зависимости от формы и размера песчинок, и поведение лишь очень немногих из них, как свидетельствует эксперимент, соответствует степенному закону [Хорган, 2003]. Весьма вероятно, что эта модель может оказаться слишком общей и статистической по своей природе, чтобы дать какую-либо физическую трактовку всему многообразию систем, которые она, возможно, описывает, а присущий ей математический формализм во многом подавляет такие тенденции.

Уместно заметить, по собственному признанию П. Бака, самоорганизованная критичность в реальности не является теорией. Она «…не может генерировать ни специфических предсказаний о природе, ни имеющих значение проникновений в суть» [Хорган, 2003].

Рассматриваемый подход к прогнозу сейсмичности не мог не вызвать серьезных возражений. В частности, по мнению И. Гуфельда, в качестве основы работ по прогнозу сейсмичности может выступать лишь понимание физических процессов в литосфере [Гуфельд, 2007, 2013а,б; Гуфельд и др., 2011].

Задача прогноза динамики системы в критическом состоянии, а в более общем контексте и теория самоорганизованной критичности, как известно, весьма корреспондируется с теорией русел и джокеров, в которой ставятся и рассматриваются фундаментальные вопросы различной предсказуемости поведения динамических систем в разные моменты времени [Малинецкий, 1998; Малинецкий, Курдюмов, 2001]. Согласно этому подходу, существуют некие «…странные места в фазовом пространстве системы, где предсказуемость является аномально хорошей» [Малинецкий, Курдюмов, 2001]. Эти области в фазовом пространстве, где поведение системы с приемлемой точностью определяется лишь несколькими переменными и появляется возможность предсказания ее поведения на некоторый промежуток времени вперед, и назван авторами руслами. Иначе говоря, там, где вопрос касается русел, сложные системы описываются относительно просто. Кроме того, в фазовом пространстве имеются области, называемые джокерами (областя-

ми джокеров, точки бифуркации) с исключительно высокой чувствительностью к малым возмущениям. Русло заканчивается, и число переменных, которые определяют ход процесса, быстро растет, горизонт прогноза быстро сжимается и появляется возможность быстрых изменений поведения системы. Методы и теории прогноза оказываются эффективными, если они удачно вписываются в свои русла. При подходе к области джокера влияние шумов резко возрастает; может оказаться, что размерность числа степеней свободы системы слишком велика, чтобы выделить в ней динамику. В итоге, очевидно, можно надеяться только на статистические методы прогноза, которые, в свою очередь, могут оказаться совершенно недостаточными для практических приложений.

Следует заметить, что хотя эта теория и менее разработана, чем теория самоорганизованной критичности, она вполне может претендовать на ведущие роли в вопросах прогнозируемости динамики сложных систем. В частности, используя концепцию русел и джокеров, можно попытаться сопрячь динамику и статистику [Малинецкий, Курдюмов, 2001]. Однако принципиально важный вопрос о том, как выделять русла, определять, где они начинаются и где оканчиваются, в общем случае остается неясным.

Что же происходит при подходе системы к точке бифуркации, и что говорит по этому поводу теория и свидетельствует эксперимент? Существуют ли предикторы — признаки, указывающие на возможность появления и развития критического процесса? В настоящее время по этим вопросам идет активная дискуссия. Существует мнение, что с точки зрения концепции самоорганизованной критичности сейсмическое событие (землетрясение) происходит, минуя стадию подготовки, и тем самым закрывается возможность постановки в ее рамках задачи прогноза [Страхов, Савин, 2013а—в]. В то же время для многих очевидно, что сильные землетрясения происходят в период эндогенного возбуждения довольно большой территории сейсмоактивной области при, хотя весьма небольших, но вполне заметных вариациях параметров среды [Гуфельд, 2007, 2013а,б]. Система эволюционирует на грани хаоса. Это поведение, назы-

ваемое слабым хаосом, является результатом самоорганизованной критичности.

Системы с хаосом обладают хорошей пластичностью: реагируя на внешние воздействия, они сохраняют тип ее движений. Ситуация меняется при приближении к точке бифуркации. В условиях близости к ней растет время релаксации отклонений, т. е. растет восприимчивость системы, преимущественно ее низкочастотная часть [Руманов, 2013]. По причине высокой восприимчивости системы происходит существенное усиление шума, причем, чем ближе к бифуркации, тем выше и острее низкочастотный пик в спектре шумов системы. Существенно, что в отличие от фликкер-шума, этот пик в спектре шумов исчезает при удалении параметров системы от критических значений.

Напомним, что фликкер-шум или шум мерцания широко распространен в природе, и его присутствие указывает на то, что на динамику системы влияют прошлые события. В системах с фликкер-шумом долгосрочный прогноз поведения системы невозможен [Руманов, 2013]. Теория самоорганизованной критичности дает достаточно общую его интерпретацию: он является суперпозицией сигналов всех амплитуд и длительностей. Белый шум означает отсутствие корреляции между текущей динамикой и прошлыми событиями.

Примечательно, что в условиях стационарного режима движений системы, вдали от бифуркаций, обычно сталкиваются с белым шумом. При приближении к точке бифуркаций растут все его моды, но низкочастотные — в большей степени (эффект резонанса на нулевой частоте). Важно, что упомянутое нарастание низкочастотных (мягких по терминологии Руманова) мод по мере приближения к точке бифуркаций стационарного режима носит универсальный характер. Таким образом, «мягкие» моды могут быть названы предвестниками катастроф. Разумеется, этот диапазон мягких мод у каждой системы свой и чтобы получить представление о нем, необходима информация, хотя бы в общих чертах, о физических процессах в изучаемой системе.

Перемежаемость, синхронизация, стохастический резонанс. Другая сторона рассматриваемой проблемы, связанная с попытками описания самоорганизующихся структур в системах, далеких от равновесия, предпринята в теории перемежаемости, представляющей собой непрерывный переход от регулярного движения к хаотическому. Это такой вид стохастических колебаний, при которых сигнал, почти периодический во времени (ламинарная фаза движения) случайным образом сменяется относительно короткими турбулентными всплесками [Копытов, 2003]. При этом число хаотических всплесков может меняться за счет внешних воздействий на систему. Это означает, что перемежаемость представляет непрерывный переход системы от регулярного движения к хаотическому. Однако эта теория объясняет лишь появление относительно длительных ламинарных областей и ничего не говорит об описании самих хаотических всплесков [Копытов, 2003]. Но чем чаще в системе происходят изменения, тем ближе она к бифуркации. Замечено, что число хаотических всплесков может существенно меняться за счет внешних воздействий на систему. Однако характеристики хаотического всплеска, в отличие от длительности ламинарной фазы, не зависят от уровня внешнего воздействия на систему и определяются только параметрами нелинейной системы.

Известный пример проявления самоорганизации в динамической системе — синхронизация автоколебаний. С развитием теории динамического хаоса исследования, связанные с различными аспектами синхронизации хаоса, стали приоритетными. Изначально термин синхронизация понимался как явление периодического режима движения под воздействием внешнего гармонического влияния на систему, находящуюся в режиме хаотических автоколебаний (синхронизация через подавление хаоса). Другой тип синхронизации хаоса наблюдается при взаимодействии в некотором смысле идентичных хаотических систем, когда с увеличением связи между ними колебания становятся полностью идентичными (полная синхронизация). Как известно, согласованный режим движения отдельных подсис-

тем сложной системы может быть обеспечен одним из ее элементов, называемым пейсмейкером [Васильев и др., 1979]. Третий тип синхронизации — синхронизация, индуцированная шумом [Анищенко и др., 1999; Лоскутов, 2010]. В целом синхронизация определяется как сближение некоторых временных масштабов, характеризующих колебания взаимодействующих систем или системы и взаимодействия. Этими масштабами могут быть как характерные времена, которым в спектре колебаний соответствует отчетливо выраженный максимум, так и определенные стохастические характеристики.

Установлено, что переход к синхронному поведению в системах происходит весьма сложным путем (эффекты «пузырения» аттрактора, изрешечивания «бассейнов притяжения» и др.). В сложной иерархической системе, в которой происходят взаимосвязанные процессы с различными характерными временами, и хаос на одних временах и уровнях самоорганизации может формировать упорядоченность, синхронизацию на других. С. Курдюков и Е. Князева выделяют три основных функции хаоса в процессе самоорганизации:

– хаос как основа при объединении простых структур в сложные;
– хаос необходим для выхода системы на один из аттракторов;
– хаос может выступать в качестве триггера, смены режимов движений системы, перехода от одной относительно устойчивой структуры к другой [Князева, Курдюмов, 2000].

В контексте того, что синхронизация рассматривается в качестве предвестника катастроф, остановимся на двух важных вопросах. Во-первых, чем определяется возможность синхронизации? Прежде всего, поведением каждой подсистемы и силой связи между ними. При этом важно, чтобы связи были глобальными, т. е. существовали не только между соседними блоками (элементами), но и между удаленными друг от друга. Напомним, что образование пространственно-связанной структуры блоков в земной коре в значительной степени определяется интенсивностью и скоростью процессов дегазации и уров-

нем внешних полей в данный период времени [Гуфельд, 2007; 2013а].

Следующий актуальный вопрос, как может происходить разрушение синхронизованного состояния? Ответ очевиден: путем ослабления связей или неадекватным воздействием пейсмейкера на ансамбль (внешнего воздействия). Важный методический вывод, вытекающий из этого рассмотрения, — в сложных динамических системах необходимо осуществлять мониторинг и контроль на разных иерархических уровнях организации системы. Появляются и новые возможности в решении задач управления нелинейными динамическими объектами различной природы [Кадомцев, 1994; Гуфельд, 2007; Шуман, 2013в]. При этом как элемент управления динамическим состоянием твердой фазы геосреды, по мнению И. Гуфельда, может выступать ее флюидная компонента.

Таким образом, важная в прикладном отношении проблема поисков предвестников исключительно трудна, так как физические механизмы их формирования и генерации неизвестны. В то же время ряд подходов к проблеме может быть заимствован из теории динамических систем и теории катастроф: с приближением к точке бифуркации (событию) происходит аномальный рост флуктуаций и так называемое критическое замедление (понижение частот колебаний), удлинение шкалы времен релаксации, увеличение корреляционных длин, ряд других явлений. Растет восприимчивость системы, преимущественно ее низкочастотная компонента [Руманов, 2013]. Слабый шум не вызывает заметного отклика системы, пока ее параметры далеки от точки бифуркации. Развитие аномальных событий возможно лишь при согласованном поведении различных подсистем иерархической системы. Это не так мало: эти общие соображения вполне могут служить основой для постановки экспериментальных, в частности, выполнения мониторинговых наблюдений. По крайней мере, они предоставляют нам новые возможности в исследовании сейсмического процесса и лишают весьма многих иллюзий. Ведь поиск предвестников во многих случаях это, как правило, эмпирика без основания. Вероят-

но, практический выход здесь состоит не в том, чтобы глубже погружаться в эту эмпирику, а чтобы идти в другом направлении.

Как уже отмечалось, системы на границе хаоса и порядка, на кромке хаоса, являются ни в полной мере регулярными и, соответственно, предсказуемыми, ни в полной мере хаотическими, непредсказуемыми. При этом хаос лежит в основе механизмов объединения относительно простых структур в сложные (синхронизация, индуцированная шумом).

Один из известных примеров поведения нелинейных систем при воздействии шума — эффект стохастического резонанса [Анищенко и др., 1999]. Этот эффект наблюдается в так называемых пороговых системах. Впервые этот термин был введен в модели, предложенной для описания периодичности в наступлении ледниковых периодов на Земле. При этом возможность переходов, переключений была достигнута путем введения некоторой дополнительной случайной силы, индуцирующей переходы через потенциальный барьер.

Очевидно, и качественные, и количественные его закономерности во многом определяются и зависят от типа системы и режима ее функционирования. Установлено, что этот эффект может быть существенно усилен в ансамбле по сравнению с отдельным бистабильным элементом системы, а ансамбль стохастических резонаторов демонстрирует эффект стохастической синхронизации при сколь угодно слабом внешнем периодическом сигнале [Анищенко и др., 1999. с. 36].

Заметим, что мы имеем дело с целым спектром явлений. Это стохастический резонанс, динамический резонанс, виброиндуцированный резонанс, шумоиндуцированные переходы, синхронизация под действием внешней периодической или случайной силы, авторезонанс как «резонанс» под действием силы, порожденной самой системой и другими эффектами [Анищенко и др., 1999; Лоскутов, 2010].

О формировании локальных зон сильнонеравновесных состояний. Сделаем попытку конкретизации некоторых положений теории подготовки и процессов сейсмических событий.

Как уже упоминалось, традиционный критериальный подход феноменологической макроскопической механики разрушения, базирующийся на макроскопическом масштабе усредненного описания геосреды, не решает проблему физики и механики разрушения [Макаров, 2011]. Рассмотрение геосреды как многоуровневой иерархически организованной системы, которая описывается в рамках нелинейной механики и неравновесной термодинамики, существенно расширяет возможности такого описания, в частности конкретизации механизмов формирования локальных зон сильнонеравновесных состояний, в которых зарождаются деформационные дефекты различного масштабного уровня [Панин и др., 2012]. Тем не менее динамическое поведение геосреды, очевидно, нельзя описать только в рамках представления механики разрушения. Весьма вероятно, что процессы подготовки очаговых зон не обусловлены всецело процессами взаимодействия трещин различного ранга, а связаны с особенностями взаимодействия блоков [Гуфельд, 2007, 2013а,б; Гуфельд и др., 2011].

Согласно И. Гуфельду, важная особенность литосферы — быстрые и разномасштабные вариации объемно-напряженного состояния, которые трактуются как реакция среды на взаимодействие восходящих потоков легких газов с твердой фазой [Гуфельд, 2007, 2013а,б]. Существенно, что такая насыщенная геосреда допускает проявление процессов, которые оказываются невозможными в других условиях. Плотность восходящих потоков меняется в пространстве и времени. При этом сток легких газов из разнесенных по глубине зон деструкции блоковых структур в межблоковые зоны быстро меняет сейсмотектоническую ситуацию [Гуфельд, 2013а,б]. Легкие газы (гелий, водород) могут аккумулировать значительную энергию путем восхождения в жидкие и твердые растворы, кластерные структуры [Вол, Гилат, 2006]. Декомпрессия разломной зоны под воздействием внешних факторов вызывает взрывной распад соединений гелия и водорода. Энергия дегазации обладает высокой плотностью, быстро концентрируется и высвобождается с высокой скоростью и так же быстро снова накапливается. В итоге

фактически можно говорить о режиме деформационной волны, распространяющейся в направлении потока легких газов. На скорость восходящего потока легких газов активное влияние оказывают также лунно-солнечные приливы, волны удаленной сейсмичности, геологические особенности среды — блочные, межблочные и разрывные структуры различного ранга [Гуфельд, 2007, 2013а,б]. При этом формирование крупномасштабных структур разрушения связывают с неконтролируемым стоком водорода и гелия в межблоковые области. Такова физическая сторона проблемы, получившей наиболее последовательное описание в работах [Гуфельд, 2007, 2013а,б; Гуфельд и др., 2011]. Обратимся далее к ее феноменологическому аспекту.

Как уже отмечалось, геосреда как нелинейная диссипативная динамическая система может характеризоваться в фазовом пространстве (пространстве состояний) несколькими аттракторами, характеризующимися определенной областью (бассейном) притяжения. Как известно, аттракторы являются с формальной точки зрения образом как автоколебаний, так и автосолитонов — собственных стационарных уединенных состояний [Кернер, Осипов, 1989]. Так как геосистема характеризуется несколькими аттракторами в ее конфигурационном пространстве, в ней могут образовываться автосолитоны различного вида и формы.

Как известно, автосолитоны могут возникать в системах, неравновесность которых определяется величиной потока (теплового, в частности, обусловленного и процессами дегазации). Для возбуждения автосолитона на систему необходимо подать локализованное возмущение достаточно большой амплитуды и длительности. В зависимости от вида возбуждающего локального возмущения и параметров системы в ней можно возбудить статические, пульсирующие, бегущие автосолитоны, а также другие более сложные уединенные автосостояния, в частности локализованные диссипативные структуры обострения.

Напомним, что современные исследования свидетельствуют о том, что землетрясения обнаруживают признаки динамических нелинейных многоуровневых систем, включая простран-

ственно-временную локализацию, автомодельность, миграцию активности по системам разломов земной коры. При этом отклик геосреды на внешнее воздействие на микроуровне определяется эволюцией ее внутренней структуры во всем спектре масштабов. Не исключено, что ряд особенностей сейсмического процесса, в частности, природа слабой сейсмичности, образование крупномасштабных разрывов в земной коре, их воспроизводство, могут найти объяснение в рамках изложенных представлений. Действительно, если попытаться истолковать сейсмическое событие как автоструктуру большой амплитуды (локализованной диссипативной структуры обострения), формирующегося за счет внешнего влияния (водородной дегазации, контролирующей основные параметры структуры блоков и процессы в межблоковых структурах) и специфических свойств шумов в системе, такой подход представляется довольно естественным.

Итак, чтобы возбудить в геосреде автосолитон, возбуждающее его локализованное пространственно-временное возмущение (импульс дегазации) должно обладать энергией, достаточной для перевода системы в состояние, отвечающее области притяжения аттрактора (в частности, странного аттрактора), соответствующего данному типу возмущения. Тогда в системе после прекращения действия этого внешнего источника происходит самопроизвольное формирование автосолитона или локализованной диссипативной структуры обострения. При этом в зависимости от параметров системы в ней может быть реализован мягкий или жесткий режим возбуждения автоструктур. При мягком режиме, когда амплитуда возбуждающего импульса остается ниже некоторого порогового значения, образуются автоструктуры малой амплитуды, а при жестком, когда амплитуда импульса возбуждения превышает этот порог, — возникновение автоструктур большой амплитуды.

Заметим, что слабый хаос — это продукт реализации мягкого режима возбуждения автоструктур. Известно также, что в активных системах внешнее воздействие неизбежно сопровождается хотя бы слабым шумом. Приобретают важное значе-

ние методы диагностики эффектов стохастического резонанса и синхронизации хаоса. В частности, для нелинейных диссипативных систем с хаотическими аттракторами в режиме индуцированных шумом переходов интенсивность периодических компонент спектра сигнала, воздействующего на систему, достигает максимального уровня при некотором оптимальном уровне шумов в ней. Соответственно, возможна реализация режима достижения порога переключения системы с одного бассейна притяжения аттрактора в бассейн другого, в частности аттрактора разрушения. Такова в общих чертах суть проблемы. Это как раз тот физический аргумент, которого недоставало в существующих теориях подготовки и реализации крупномасштабного разрыва в межблоковой структуре.

В случае неоднородных сред следует подчеркнуть фундаментальную роль механических жестких образований (блоков), которые являются источниками бегущих автоволн — пейсмейкеры. Предполагается, что непосредственно перед появлением крупномасштабного (магистрального) разрыва в геосреде образуется специфическая структура, состоящая из нескольких прочных областей (блоков) и области сдвиговой ползучести. Это состояние называют предразрушением. Имеются основания считать, что в процессе формирования крупномасштабного разрыва значительный вклад вносят деформационные фронты, сопровождающиеся декомпрессией и взрывной дегазацией. При этом начало интенсивной подпитки некоторой локальной области деформационными фронтами можно считать началом режима обострения. Очевидно, это состояние можно рассматривать в качестве физико-механической основы существования и проявления предвестниковых процессов. Как известно, в качестве таковых могут служить, в частности, процесс нарастания мелких (низкочастотных) мод в спектре шумов системы или эффекты потери мультифрактальности в динамике геосистем [Любушин, 2011б; Руманов, 2013].

В заключение раздела обратимся к еще одной важной стороне проблемы — воспроизводимости крупномасштабных разрывов в одних и тех же структурах. Можно предположить, что

с формальной феноменологической точки зрения этот процесс ассоциируется с процессом возвратов Пуанкаре. Как известно [Анищенко, Астахов, 2013], возвращаемость по Пуанкаре означает, что любая фазовая траектория системы, начинающаяся в некоторой точке фазового пространства, с течением времени бесконечное число раз пройдет сколь угодно близко от этой точки, что, по сути, является отражением динамики системы во времени.

Задачи реконструкции и прогноза. Временные ряды. Как известно, задача получения динамического описания нелинейных систем с хаотическим поведением по экспериментальным данным становится в последние годы все более актуальной в связи с необходимостью предсказания их поведения [Любушин, 2007; Безручко и др., 2008; Лоскутов, 2010; Чернавский и др., 2011; Дубовиков, Старченко, 2011 и др.].

Эта задача при экспериментальных исследованиях обычно реализуется посредством обработки регистрируемых сигналов, произведенных системой. Прогноз по временным рядам — одно из важных направлений приложения результатов теории динамических систем к решению практических задач. При этом же сразу возникает ряд принципиальных вопросов. В частности, можно ли только на основании анализа временного ряда как функции времени сделать вывод, произведен ли он динамической системой или это случайный шумовой процесс. Если же это динамическая система, то что можно сказать о ее свойствах и характеристиках: сколько переменных необходимо для задания ее состояния и можно ли предположить такую модель, которая позволила бы адекватно воспроизвести наблюдаемую временную зависимость и прогнозировать будущее состояние системы. Очевидно, наличие только лишь временного ряда сильно ограничивает возможность получения информации об изучаемой системе. Разнообразие специфических ситуаций, шумы и нестационарности предопределили появление нескольких подходов к их анализу. Одни развивались в русле математической статистики и спектрального анализа, теории информации и нелинейной динамики [Безручко и др., 2008; Лоскутов,

2010; Дубовиков, Старченко, 2011]. В других поиск решения задачи шел на путях реализации концепции русел и джокеров, где выделялись области детерминированного (русло) и случайного (джокера) поведения рассматриваемого хаотического ряда [Малинецкий, Курдюмов, 2001]. А. Любушин рассматривал поиск предвестников сильных землетрясений как эффектов увеличения синхронизации (когерентного поведения) скалярных компонент многомерных временных рядов систем мониторинга [Любушин, 2011б]. При этом он исходил из статистически значимого уменьшения среднего значения ширины носителя мультифрактального спектра сингулярности.

Предполагается, что наблюдаемый временной ряд генерируется неизвестной хаотической системой, которая и определяет его динамику. При этом особое внимание уделяется нерегулярным сигналам, которые выступают в качестве индикаторов типичности хаотического поведения изучаемой нелинейной динамической системы. К настоящему времени разработаны методы такого прогноза, которые подразделяются на два основных типа — локальные и глобальные [Лоскутов, 2010]. Эта классификация проводится по области определения параметров аппроксимирующей функции, рекуррентно устанавливающей последующие значения временного ряда по предыдущим. В глобальных методах на основе статистического анализа используются авторегрессия, скользящее среднее. Локальные методы основаны на локальной аппроксимации ряда. Ее применение не требует априорной информации о динамической системе, которая порождает временной ряд. Однако длина обрабатываемого ряда должна быть достаточно большой, а его шумовая компонента — малой. Развиты эффективные подходы для преодоления этих трудностей. В частности, один из них, позволяющий исследовать зашумленные ряды относительно небольшой длины, основан на сочетании сингулярного спектрального анализа и локальной аппроксимации [Лоскутов, 2010].

В отличие от перечисленных методик анализа, в которых временные ряды обрабатываются «непосредственно», существует и «опосредованный» подход, в котором по исходным вре-

менным рядам формируются некие «предсказательные» математические модели и прогноз осуществляется по их свойствам.

Заметим, что современный подход к обнаружению динамических закономерностей из экспериментальных данных (временных рядов) основан либо на дискретных моделях, которые описываются разностными уравнениями, либо на непрерывных моделях, описываемых обыкновенными уравнениями. Существенно, что теорема Такенса подготовила почву для построения алгоритмов предсказания поведения системы с использованием сведений о динамической природе наблюдаемого временного ряда [Лоскутов, 2010]. При этом на основании исследования временных рядов можно отличить случайное стохастическое поведение системы от детерминированного хаоса, установить размерность аттрактора, другие ее инвариантные характеристики. Этот аспект является очень важным для приложений, поскольку он позволяет установить природу экспериментально полученного сигнала [Лоскутов, 2010], т. е. генерируется динамической системой или же он является шумовым.

Разумеется, при решении задач прогнозирования динамики сейсмической активности одной из важнейших предпосылок адекватности моделей является рассмотрение результатов моделирования в непосредственном контакте с геосредой, в которой развивается реальный сейсмический процесс. Если такой анализ возможен, тогда аппарат нелинейной динамики превращается в мощный инструмент исследования возможностей прогноза и, возможно, поиска путей к управлению динамикой системы посредством внешних воздействий [Гуфельд, 2007; Шуман, 2011а,б, 2013а, б].

Комментарии и обсуждение. Конкретизируем некоторые общие положения теории сейсмичности и подведем некоторые итоги.

Весьма привлекательная идея построения феноменологической модели сейсмичности аналогично тому, как термодинамика в свое время была построена значительно ранее статистической физики, высказанная в работе [Фридман и др., 2010], весьма проблематична. Как известно, термодинамика только на

первый взгляд является феноменологической. В действительности она может быть построена на базе статистической физики представляющей собой специфическую разновидность динамики [Кадомцев, 1994].

Определение сейсмичности как «турбулентности» в земной коре, данное Каганом [Kagan, 1994], также является весьма спорным. Согласно почти что общепринятой точке зрения, турбулентность является процессом хаотическим. Но существуют и другие представления. Как уже упоминалось, начиная с работ Рейнольдса, предполагалось, что турбулентность в жидкостях и газах может быть полностью описана в рамках уравнений Навье—Стокса. Это означало, что турбулентность трактовалась как автоколебательный процесс. При этом автоколебания в сплошной среде связывались с большим числом степеней свободы системы. Позднее, в 1970-х годах прошлого века, в связи с открытием динамического хаоса стал приобретать популярность взгляд на турбулентность как скачкообразное возникновение в фазовом пространстве системы странного аттрактора, т.е. с возбуждением автоколебаний в динамических системах. Однако дальнейшие теоретические разработки не подтвердили тезиса о появлении турбулентности как автоколебательного явления [Ланда и др., 2009]. По мнению этих авторов, мифом является и описание перехода от ламинарного течения к турбулентному как возбуждение автоколебаний, а существование подобных структур (аттрактора) является еще одним из мифов.

Таким образом, следует различать турбулентность и динамический хаос: последний является общим свойством динамических систем с размерностью больше двух, в то время как турбулентность — частный пример случайных волн [Ланда и др., 2009].

В рамках общей теории сложных динамических систем изучение свойств геосреды, кластерной сущности ее организации как и их мониторинг ограничены и доступны лишь отчасти. Основные задачи нелинейно-динамического подхода заключаются в выработке на основе геофизических и других данных адекватных динамических образов ключевых явлений, происходящих в геосистеме, построенных на их основе базовых мо-

делей, и исследовании динамики этих моделей. Однако развитие нелинейно-динамического подхода применительно к геосреде сталкивается со значительными трудностями, связанными с ее необычностью и сложностью. Ее свойства лишь отчасти известны и достоверны для понимания.

Установлена возможность существования принципиально различных — регулярных и стохастических — режимов развития сложной динамической системы. Фундаментальное свойство эволюционных процессов в них — это наличие двух стадий — квазистационарной (сравнительно медленного накопления изменений), и сверхбыстрого этапа эволюции (режим с обострением).

Обнаружено, что сложное пространственно-временное поведение распределенных сред с очень большим числом степеней свободы может быть адекватно описано нелинейными системами небольшой размерности. Однако вся сложность в поведении динамических систем заключается в существовании множеств (возможно, меры нуль) траекторий, сильно влияющих на их динамику и пути развития. Такая точка зрения, игнорирующая рассмотрения редких траекторий, принята в эргодической (метрической) теории динамических систем [Лоскутов, 2010]. В поведении слабохаотических систем (систем, эволюционирующих на грани хаоса) в отличие от полностью хаотических отсутствует временной масштаб (горизонт прогноза), выход за пределы которого практически невозможен.

Перемежаемость — характерное свойство динамических систем весьма различной природы, при этом сигнал, генерируемый системой, представляет собой чередующуюся последовательность регулярных фаз и хаотических всплесков. Режимы перемежаемости экспоненциально чувствительны к внешнему шуму. К сожалению, однако, эта теория ничего не говорит об описании хаотических всплесков при смене ламинарного режима хаотическим.

Вполне вероятно, что модель самоорганизованной критичности может оказаться слишком общей и статистической по своей природе, чтобы дать физическую трактовку многообра-

зию систем, которые она признана описать. Несомненно, устойчивое состояние существует, но область (бассейн) притяжения траекторий системы непрерывно меняется [Руманов, 2013, с. 41]. Сильная нелинейность разрушает фазовую структуру пространства. Процессы в таких распределенных системах развиваются на множестве пространственно-временных масштабов, при этом их свойства зависят от их состояния, а процессы весьма разнообразны. В этой связи можно упомянуть такие явления, как стохастический и динамический резонанс, виброиндуцированные режимы, шумоиндуцированные переходы, синхронизацию под действием внешних периодических сил, авторезонанс [Лоскутов, 2010]. В такой сложной ситуации тезис о принципиальной непредсказуемости тем не менее нуждается в уточнении. В частности, проблема прогноза может рассматриваться как задача исследования отклика системы на многочастотные и шумовые сигналы внешнего и внутреннего происхождения. Статистический подход в принципе не позволяет реализовать краткосрочный прогноз. Трудности кратковременного прогноза во многом связаны с наличием шумов в геосреде. Шум может индуцировать новые режимы ее функционирования. Один из наиболее ярких примеров указанного типа — эффект стохастического резонанса, который в зависимости от свойств сигнала, шума и конкретных параметров системы будет характеризоваться весьма специфическими свойствами. В частности, стохастический резонанс может быть существенно усилен в ансамбле по сравнению с отдельным элементом системы [Анищенко и др., 1999]. Он может интерпретироваться в качестве фундаментального порогового эффекта. Особый интерес представляет тот случай, когда последовательность случайных событий, сумма регулярной и шумовой компонент сигнала, действующего на систему, превышает (пересекает) некий заданный пороговый уровень. Всякий раз, когда уровень порога пересекается в одном направлении, генерируется событие. Сам процесс пересечения порога порождает во времени случайную их последовательность.

При экспериментальных исследованиях изучение поведе-

ния систем обычно осуществляется посредствам соответствующей обработки сигналов, генерируемых систем [Лоскутов, 2010]. В частности, именующиеся методы анализа временных рядов (наблюдаемых) позволяют в ряде случаев реализовать на практике известные результаты теории динамических систем для получения таких характеристик, как показатели Ляпунова и размерность. Задача прогноза в общем случае ставит своей целью определение каких-либо качественных и количественных параметров будущего поведения временного ряда на основе всего массива данных. При этом особый интерес представляет задача определения ранних предвестников критического поведения ряда. На основе индекса фрактальности выявлен эффект увеличения крупномасштабных колебаний при подавлении мелкомасштабных. Известный эффект затишья в сейсмологии — частное проявление указанного эффекта [Дубовиков, Старченко, 2011]. Мультифрактальность можно рассматривать как достаточно общее явление. В последние годы наличие мультифрактальности или сложного скейлинга в структуре сейсмичности широко дискуссируется [Любушин, 2011б, 2013]. Новый взгляд на проблему исследования сложных сигналов — мультифрактальный анализ, основанный на непрерывном вейвлет-преобразовании, базисные функции которого являются хорошо локализованными [Дремин и др., 2001]. Приобрел популярность метод максимумов модулей вейвлет-преобразования.

Однако, несмотря на имеющиеся весомые аргументы в пользу стадии подготовки критических событий и принципиальной возможности ее экспериментального обнаружения, следует признать, что ожидаемые преимущества и эффективность все еще остаются нереализованными. И далее, эта плодотворная на первый взгляд идея извлекать динамику непосредственно из данных наблюдений (временных рядов) наталкивается на существенное препятствие — ограниченность, неполноту и зашумленность экспериментальных данных. Поиски предвестников все еще связаны с эмпирикой без должного теоретического основания.

В рассматриваемом контексте обратим внимание еще на

одно важное обстоятельство: в физических системах рассматриваемого типа при изменении какого-либо параметра до определенного уровня (значений) часто отсутствует предел, т. е. предельное значение зависит от того, с какой стороны происходит переход к пределу. Как известно, именно этим можно объяснить возможность хаотических решений в динамических системах (согласно теореме единственности такие решения невозможны) [Ланда др., 2009]. В итоге экспериментальные данные часто не позволяют дать однозначную трактовку наблюдаемым явлениям, т.е. создать адекватную теорию, основанную исключительно на этих данных.

Остаются нерешенными проблемы описания динамики фрактальных сред, связи дискретных и непрерывных моделей геосистем. Важно также заметить, что все изученные системы прогнозируемы благодаря их колебаниям вокруг критической точки [Шаповалов, 2011].

Одной из важнейших характеристик равновесия в системе является восприимчивость. Критические явления обусловлены восприимчивостью [Руманов, 2013]. Синхронизация означает приближение к сильному событию. Слабый шум не оказывает заметного влияния на поведение системы до тех пор, пока ее параметры далеки от точки бифуркации. При подходе к ней из-за высокой восприимчивости наблюдается резкое усиление шума: происходит нарастание низкочастотных («мягких») мод в спектре шумов системы [Руманов, 2013].

Разумеется, проще и безопаснее проблему прогноза считать нерешаемой и некорректной, а рассмотренные выше конструкции, несмотря на их теоретическую обоснованность и экспериментальное (хотя и ограниченное) подтверждение, — экзотическими и труднореализуемыми. Вообще говоря, сегодня эта проблема может рассматриваться как реальность в ее норме, так и воплощение иллюзий весьма широкого спектра. Тем не менее постановка и подходы к ее решению кажутся вполне естественными. Сегодня уже имеется положительный, хотя и ограниченный опыт такого прогноза [Любушин, 2011б; Страхов, Савин, 2013а—в]. Очевидно, здесь мы имеем дело с рождением

нового раздела физики, посвященного изучению новых динамических свойств систем различной физической природы и масштабов, не зависящих от типа среды или системы, в которой осуществляется эта динамика. Оно включает исследование сложных сред, процессов, явлений и систем, характеризующихся пространственной и временной нелокальностью, немарковской динамикой, фрактальностью структуры и ее нецелой топологической размерностью.

Ввиду сложности объекта исследований (геосреды и процессов в очаге готовящегося события, разворачивающихся на множестве пространственно-временных масштабов) требуются и специфические методы мониторинга на разных иерархических уровнях его организации. Очевидно, помимо классических пассивных методов он должен быть дополнен активным, в частности исследованием отклика системы на многочастотные и шумовые сигналы внешнего и внутреннего происхождения. При этом в качестве первоочередного являются задачи определения восприимчивости системы и меры ее синхронизации (ширины спектра сингулярности), исследование режимов перемежаемости, структуры сигналов, воздействующих на систему, динамики спектра ее шумов, определение ранних предвестников критического поведения рядов наблюдений. Критически важное значение имеет также выбор модели, система сбора информации и ее последующей обработки, где особенно проявляются ограничения технического и экономического характера. Однако трудности и формализм в существующих и разрабатываемых методах прогноза не должен довлеть над физическим содержанием проблемы или подавлять его. Однако в любом случае весьма сложно согласиться с одним из уже упоминавшихся положений Решения Российского экспертного совета от 23 декабря 2012 г., приведенных в работе [Страхов, Савин, 2013а—в], о вторичности или даже вредности теории в объяснении экспериментальных фактов. Ситуация представляется совершенно иной: изложенные соображения, в принципе, позволяют формализовать весьма непростые взаимоотношения между экспериментом (в частности, мониторингом) и прогно-

стической моделью в рамках концепции нелинейной динамики. Существенно, что исследуя только экспериментальные данные (временные ряды — сигналы, генерируемые системой), можно отличить случайное, стохастическое поведение системы от детерминированного хаоса и в отдельных случаях предсказывать дальнейшую ее эволюцию. В то же время с позиций нелинейной динамики стало очевидным, что задача прогноза является значительно сложнее, чем это представлялось ранее и зачастую не укладывается в рамки, предоставляемые теорией.

Обратим внимание еще на одно важное обстоятельство. Некоторые исследователи полагают, что весьма полную информацию о свойствах граничных структур и динамике блоковой системы литосферы вполне вероятно получить на основе анализа микросейсмического шума, возбуждаемого за счет восходящих переменных потоков легких газов (водород, гелий и др.) [Гуфельд и др., 2011]. Разумеется, сейсмические методы при этом вполне обоснованно считаются и остаются ведущими в исследовании глубинной структуры и изменений параметров геосреды. Заметим, однако, что геометрический шум литосферного происхождения — это универсальный эффект, он обусловлен только наличием диффузии и может проявляться при генерации возмущений различной природы, в частности, и электромагнитных флуктуаций. Очевидно, с этой точки зрения разграничивать или противопоставлять между собой сейсмоакустическую и электромагнитную эмиссию литосферы представляется безосновательным.

Как известно, одна из моделей описания флуктуаций сейсмоакустической и электромагнитной эмиссии в процессе перестройки структуры пород под действием восходящих потоков легких газов связана с перколяционной моделью диффузионного фронта. Известно также, что проявление свойств перколяционного типа весьма вероятно в материалах с низкой проницаемостью и в трещиноватых породах [Гийон и др., 1991]. В итоге модель фронта градиентной скалярной перколяции позволяет дать физическую интерпретацию наблюдаемых параметров высококачественного сейсмического шума и спонтанной электромагнитной эмиссии как неравновесного самоорга-

низованного критического явления. Однако, к сожалению, спонтанная электромагнитная эмиссия литосферного происхождения, в отличие от сейсмической, весьма зашумлена электромагнитными возмущениями магнитосферно-ионосферно-атмосферного происхождения, что накладывает существенные ограничения на ее использование при мониторинговых наблюдениях и требует специальных методических приемов для ее выделения. Однако, несмотря на технологические трудности теоретического описания, компонента спонтанного электромагнитного шума литосферы дает уникальные возможности получения информации об электродинамических свойствах геосреды, ее состоянии и динамике [Шуман, 2013в].

Заключение. Как известно, дискуссия о возможности прогноза и прогнозируемости сейсмичности опирается на представление о сейсмическом процессе как эволюции системы литосферных блоков различной величины с самоподобной структурой и, соответственно, геосреды как активной нелинейной динамической системы. В общем случае эти вопросы могут интерпретироваться как задача изучения отклика этой системы (геосреды) на многочастотные и шумовые сигналы различного происхождения. Их сложность, очевидно, обусловлена сложностью самой исследуемой системы и многофакторностью действия на нее физических полей. В этом смысле задача нелинейно-динамического подхода применительно к прогнозу, прогнозируемости и построению ее феноменологической модели может быть сформулирована как разработка адекватных моделей динамических образов явлений и особенностей сейсмического процесса в геосреде на основе данных о мониторинге сигналов, генерируемых системой, и исследование динамики этих моделей. При решении этого круга задач возникают важные и трудные проблемы соотношения теории и эксперимента. В частности, экспериментальные (мониторинговые) данные в силу разных причин (ограниченность, несистематичность, зашумленность, трудности доступа и др.) часто не позволяют дать однозначную трактовку наблюдаемым явлениям и, соответственно, ставить задачу создания адекватной теории, основанной на

этих данных. Проблемными остаются вопросы описания динамики фрактальных сред, связи дискретных и непрерывных моделей геосреды с нелокальностями степенного типа.

Тем не менее проблема не выглядит безнадежной. Оптимизм, очевидно, может ассоциироваться с тем, что сложное пространственно-временное поведение распределенных систем с очень большим числом степеней свободы, когда извлечение нелинейной динамики весьма затруднительно или невозможно, в некоторых случаях может быть адекватно описано нелинейными системами относительно небольшой размерности.

Как известно, возможность прогноза и прогнозируемость базируются на осознании и убежденности типичности хаотического поведения нелинейных динамических систем. При этом теория предоставляет нам весьма небольшое число универсальных сценариев перехода от порядка к хаосу, т.е. переходам исследуемой системы в ее фазовом пространстве из области русел в область джокера. Установлено существование стадии (фазы) подготовки сейсмических событий. С приближением к событию (порогу) происходит аномальный рост флуктуаций и так называемое критическое замедление, т. е. понижение частот колебаний некоторых мод, удлинение шкалы времен релаксации, удлинение корреляционных длин, эффекты синхронизации, индуцированные шумом переходы, одним из ярких примеров которых является стохастический резонанс.

При отсутствии теории эти весьма общие и универсальные соображения могут рассматриваться в качестве минимальной основы или предпосылки для постановки экспериментальных работ, в частности мониторинговых наблюдений. Как свидетельствует теория и эксперимент, предвестниковые проявления присущи сейсмичности. Статистический подход к ее прогнозу не может считаться более предпочтительным, чем исследование физики процесса, его динамического видения. Теория русел и джокеров, в принципе, позволяет сочетать динамику со статистикой. Тем не менее следует признать, что хотя приведенные аргументы в пользу присутствия стадии подготовки и выглядят весьма весомо и убедительно, их ожидаемые преимущества по-

ка не реализованы в должной мере. Очевидно, при этом наиболее значимым приложением теории сложных нелинейных иерархических систем является прогнозирование динамики порождаемых ими сигналов (рядов наблюдений). В русле рассматриваемых идей обратим внимание на фундаментальное значение флуктуационно-диссипативной теоремы, связывающая спонтанные флуктуации системы с ее диссипативными свойствами, и S-теоремы (закон уменьшения энтропии) Климонтовича. И, наконец, вопросы прогнозируемости рассматриваемых сложных динамических систем могут быть отнесены к междисциплинарным, включающим направления физики, математики, информатики, геофизики и их весьма деликатном взаимодействии.

В заключение, предпримем попытку в сжатой форме резюмировать сказанное.

Очевидно, можно утверждать, что стадия перехода к джокеру или, точнее, режиму экспоненциальной (взрывной) неустойчивости геосистемы удовлетворяет в некоторой отдельной пространственной ее части своеобразному принципу минимального производства энтропии за счет резкого снижения скорости диссипации поступающей энергии в результате образования пространственно связанной структуры блоков и когерентности колебательных волновых процессов, протекающих на разных масштабных уровнях системы — геосреды. В итоге можно говорить о своеобразном нарушении второго начала термодинамики, согласно которому все процессы в макромире сопровождаются возрастанием энтропии — меры хаоса и беспорядка.

Наиболее радикальным и, возможно, эффективным решением проблемы снижения сейсмической опасности является разработка методов контролируемого воздействия на эту стадию с целью ее разрушения на относительно раннем, начальном этапе ее развития. В этом контексте исследование сейсмоакустических и электромагнитных шумов в системе имеет критически важное значение, также позволяет, в принципе, диагностировать приближение этой особой стадии ее развития,

эволюции. В частности, эта цель может быть достигнута по нарастанию низкочастотных (мягких) мод в шумовых полях [Руманов, 2013], выявлении скрытых признаков роста их синхронизации [Любушин, 2011б], анализе кооперационных взаимодействий элементов геосреды на различных ее масштабных уровнях [Пантелеев и др., 2913]. Существенно, что эти признаки носят универсальный, всеобщий характер.

Сейсмический процесс и современные мониторинговые системы

Геофизический журнал,
№ 4, Т. 36, 2014, С. 50—64.

Введение. В предыдущих работах [Шуман, 2011б, 2013б,в] отмечены некоторые итоги и результаты применения нелинейно-динамического подхода к прогнозу, прогнозируемости сейсмического процесса и разработки его феноменологической модели. При этом возможность прогноза и прогнозируемость базируются на осознании и убежденности типичности поведения нелинейных динамических систем. Как известно, основные свойства геосреды как динамической системы — диссипативность динамики, компенсация энергетических потерь за счет действия внешних и внутренних источников, активность ее отдельных элементов (блоков различного ранга). Она не может больше рассматриваться в качестве пассивного континуума, ей оказалась присуща внутренняя самоподобная структура, во многом определяющая природу и характер сейсмического процесса. В геосреде реализуются комплексы нелинейных взаимодействий между физическими полями, структурами и подсистемами, а мультифрактальность может рассматриваться как достаточно распространенное явление. Очевидно, в этой ситуации

разработка адекватных моделей геосреды и моделирование закономерностей развития сейсмического процесса оказываются тесно связанными между собой.

Заметим, что природа сейсмичности рассматривалась во всех основополагающих работах по физике Земли. Как известно, со времени выхода первых работ Ф. Рейда и Ч. Рихтера было разработано множество моделей по физике и динамике очаговых зон и сейсмического процесса в целом. В этой области исследований сложились известные научные школы М. Саудовского, В. Кейлис-Борока, Т. Рикитаки, В. Страхова, Г. Соболева и других исследователей.

Удачное, по мнению автора, изложение состояния данной проблемы по состоянию на 2007 г. приведено в известных работах Ю. Ребецкого [Ребецкий, 2007а,б] и И. Гуфельда [Гуфельд, 2007]. Большой резонанс среди геофизиков вызвала концепция самоорганизованной критичности П. Бака, ориентированная на описание эволюции самоподобных диссипативных открытых систем, к которым может быть отнесена и геосреда.

Несомненно, синергетическая концепция способствовала пониманию и конкретизации целей и задач прогнозных исследований. Тем не менее проблема прогноза сейсмичности, в частности прогноза сильных событий, оказалась существенно сложнее, чем это казалось еще 5—10 лет назад. При этом наибольшие затруднения возникают с предсказанием времени их поступления. Неудачи последних лет на этом пути, понимание сложности проблемы, казалось бы, не прибавляют энтузиазма в ее исследовании. Однако в самое последнее время мы являемся свидетелями резкого возрастания интереса к задаче прогноза землетрясений (см., например, [Макаров, 2011; Трофименко, 2011; Гуфельд и др., 2011; Николаевский, 2011; Шаповал, 2011; Страхов, Савин, 2013а—в; Гуфельд, 2013а; Пантелеев и др., 2013; Шуман, 2011б, 2013б,в; Бучаченко, 2014 и др.]). И дело здесь не в «патологическом интересе к прогнозу» по образному выражению Ч. Рихтера, а в актуальности и важности проблемы, новых возможностях ее анализа в свете современных концепций возможных механизмов формирования очагов будущего разруше-

ния, идей иерархичности и многомасштабности деформационных процессов — базовых идей физической мезомеханики и нелинейной динамики, связи коровой сейсмичности с глубинной дегазацией, учета структуры и временных изменений параметров геосреды. Очевидно, что и традиционные подходы, и в значительной степени новые концепции описания все еще не соответствуют реальной сложности процессов в геосреде, определяющих механизмы генерации землетрясений. Эти идеи и концепции, однако, не получили повсеместного признания, поскольку полученные на их основе результаты все еще достаточно скромны, во многом носят абстрактный характер и остается неясным, в какой степени данные конструкции имеют отношение к реальности. К сожалению, большинство понятий из этих областей исследований сильно формализовано и нередко их физический смысл теряется или ускользает за завесой абстрактных рассуждений и терминов.

Наша задача — обратить внимание на важные с нашей точки зрения аспекты теории, отдельные ее фрагменты и попытаться представить себе, как могут выглядеть вещи, если перестать притязать на теорию, акцентируя, в основном, внимание на физической стороне дела.

Как известно, теория имеет дело с идеализированной системой, а эксперимент — с реальной. Напомним, что согласно Р. Фейнману, у нас всегда есть возможность опровергнуть теорию, однако мы практически никогда не можем доказать, что она верна.

Может оказаться уместным и следующий вопрос: невозможность предсказывать результаты, вообще говоря, это достоинство или недостаток? В настоящее время нелинейная динамика лишила нас иллюзии глобальной предсказуемости, но она позволила увидеть и принципиальные трудности, и новые возможности решения проблемы. В частности, остаются неразработанными проблемы многоуровенной самоорганизации и учета нелинейности иерархически организованной системы. Не существует общепризнанной механической модели сейсмического процесса, физики и природы быстрой изменчивости

параметров геосреды, генерации и распространения спонтанного сейсмоакустического и электромагнитного шумов литосферы, совместного воздействия периодических сигналов и шумов на нелинейные системы, процессов деформации и разрушения геосреды. Другой важный аспект проблемы — возможность поиска реальных предвестников сейсмических событий как части единого сейсмического процесса и анализ особенностей используемых в настоящее время методов его мониторинга. Очевидно, основой этих экспериментальных исследований может служить только должное понимание процессов, протекающих в литосфере. Приблизить и конкретизировать постановку задачи мониторинга, ориентировать его на получение необходимых сведений о состоянии геосреды и протекающих в ней процессах, обратить внимание на ее своеобразие и возможности экспериментальной реализации и является основной задачей данной работы.

Состояние вопроса. Приведем некоторые известные положения общего характера, важные с точки зрения решения поставленной задачи. Согласно работам [Садовский, 2004; Гершафт, 2009], для Земли можно установить пространственно-временную иерархичность состава, структуры и процессов. При этом приходится рассматривать процессы в дискретной (блочной) среде и считать среду многофазной, т. е. учитывать ее твердую, жидкую и газовые компоненты.

Геосреда — хороший пример открытой, энергетически насыщенной нелинейной диссипативной системы с множеством самоорганизующихся структур (взаимодействующих отдельностей по терминологии М. А. Садовского). Она непрерывно подвергается действию разномасштабных внешних и внутренних сил. Обычно под внешними силами подразумевается эволюция приливных деформаций в системе Земля—Луна—Солнце, а под внутренними — широкий спектр физико-химических процессов в системе ядро—мантия—литосфера. В качестве основного переменного фактора, определяющего текущую нестабильность среды вблизи состояния, близкого к критическому, может служить восходящий поток легких газов (водород, гелий и

др.), а изменчивость ее параметров, которая может быть весьма быстрой, является результатом его непрерывного взаимодействия с твердой фазой литосферы [Гуфельд, 2007].

В геосреде постоянно идут необратимые диссипативные процессы (диффузия, химические реакции, фазовые переходы), существуют комплексы нелинейных взаимодействий между физическими полями, структурами и подсистемами. Источник энергии в ней делокализован и распределен по всей системе.

Установлено, что диссипативные твердотельные структуры, самоорганизующиеся в открытых системах такого типа и формирующиеся в условиях диссипации, являются фрактальными. При этом движущей силой самоорганизации в диссипативных системах рассматриваемого типа является стремление вещества к снижению энтропии, а представления об автоволновых механизмах самоорганизации в активных средах приобретают в последние годы достаточно широкое распространение. Автоволны — яркий пример диссипативной структуры, имеющей непосредственное отношение к самоорганизации в геосреде как открытой неравновесной системе с множеством самоорганизующихся структур, а мультифрактальность может рассматриваться как достаточно общее явление.

Геосреда как нелинейная динамическая система обладает свойством самоорганизованной критичности. В ней нельзя выделить статические независимые масштабы. Экспериментально и теоретически установлены длиннокорреляционные многомасштабные взаимодействия, наличие медленной динамики, в частности обнаружение волн «маятникового» типа, ответственных за передачу колебаний в системе массивных блоков и более податливых прослоек, других волновых эффектов, обязанных своим происхождением дискретности геосреды. Существенно, что наличие временных задержек в связях между элементами геосистемы может приводить к существенному изменению и усложнению ее коллективной динамики (динамики ансамбля). В частности, при существенном запаздывании в геосистеме возникают новые динамические свойства, такие как увеличение длительности переходных процессов, рост областей

мультистабильности и появление ее новых типов. Отмечается большая роль запаздывания в синхронизации автоколебаний. Развитие катастрофических событий возможно лишь при согласованном поведении различных частей геосистемы.

Еще одна важная сторона рассматриваемой проблемы — наличие шумов в системе. В частности, отклик геосреды на внешнее воздействие может быть различным в зависимости от условий самовозбуждения в данный конкретный момент времени. Наличие источников шума в такой системе может индуцировать принципиально другие режимы функционирования, которые не могут быть реализованы в отсутствие шума. Шум может вызывать рост степени порядка в системе [Анищенко и др., 1999]. Характерный пример — поведение нелинейной системы при воздействии шума — эффект стохастического резонанса (СР). При этом достаточно наличия шума любой интенсивности, чтобы в ансамбле наблюдался эффект СР, который может интерпретироваться в качестве фундаментального порогового эффекта. Иначе говоря, воздействие шума может привести к реализации случайных переключений между сосуществующими аттракторами системы [Анищенко и др., 1999]. Синхронизация — один из важных нелинейных эффектов, сопровождающих СР. Представляет интерес проблема синхронизации ансамбля (системы блоков геосреды) внешним, возможно периодическим, сигналом при заданном уровне шума. В ансамбле эффект СР может быть существенно усилен. Напомним, что геосреда — релаксационная система, поэтому резонанс в обычном его физическом понимании в ней не может иметь места.

Яркий пример диссипативной структуры, имеющей непосредственное отношение к самоорганизации в геосреде — автоволны. Как известно, энергия автоволной не переносится, а высвобождается. В однородной активной среде ее скорость распространения, длина и форма сохраняются и не зависят от начальных и граничных условий. В неоднородных активных средах автоколебательная система содержит свой спектр собственных стоячих волн, хотя возможна и бегущая автоволна. При

этом вследствие порогового эффекта неоднородные активные среды могут гасить автоволновые процессы, а хаос является неизбежным атрибутом их жизни.

Итак, основные свойства диссипативной геосистемы, в которую поступает энергия, определяются составом и типом ее структурных элементов, притоком энергии и факторами внешней среды. Другая важнейшая сторона вопроса — это проблема прогноза разрушения нелинейных деформационных систем, генерации сейсмоэлектромагнитного шума как с точки зрения изучения закономерностей и механизмов его генерации, так и получения информации о свойствах геосреды, условиях ее деформирования и прогноза сейсмичности.

Процессы самоорганизации и механизмы формирования очагов разрушения. На протяжении достаточно длительного времени в теории разрушения твердых тел доминировала кинетическая концепция усталостного разрушения С. Н. Журкова [Журков, 1968]. Это статистическая по своей природе теория, направленная на оценку некоего «среднего срока жизни» нагружаемой среды, развитая в рамках линейных приближений механики сплошной среды (макромасштабный уровень) и физики деформационных дефектов в нагруженном твердом теле (микромасштабный уровень). Очевидно, из такого представления о механике довольно естественно следует механистический подход к процессам разрушения и развития очага землетрясения без учета «блочного аспекта» устройства реальной структуры геосреды. Однако в последние годы в самой механике взгляды существенно изменились. На передний план вышла эволюционная концепция разрушения, которая в отличие от традиционного критериального подхода феноменологической макроскопической механики разрушения, основанного на макроскопическом масштабе усредненного описания, опирается на идеи иерархичности и многомасштабности деформационных процессов [Марков, 2008]. Существенно, что степенные законы распределения являются фундаментальным свойством эволюции большинства многомасштабных иерархических нелинейных систем, в частности геосреды [Макаров, 2011]. У открытых

систем такого типа (систем с диссипацией) фазовое пространство можно представить себе разделенным на области притяжения к различным аттракторам — равновесию, периодическим колебаниям или странному аттрактору. Одним из них может быть разрушение системы [Кадомцев,1994]. Как известно, в сложных физических системах со многими аттракторами может развиваться процесс упорядочения, который и получил название самоорганизации. Идеи о самоорганизации и образовании диссипативных структур в открытых системах такого типа оказались очень важными для того, чтобы перебросить мост между физикой, механикой и геофизикой. В частности, здесь в качестве примера можно привести широко известную концепцию прогноза сейсмичности, предложенную В. И. Кейлис-Бороком, основанную на идеях нелинейной динамики иерархических диссипативных систем.

Стала очевидной необходимость рассмотрения деформационного твердого тела в качестве многоуровенной иерархически организованной системы, которая должна описываться в рамках нелинейной механики. На передний план вышли проблемы многоуровенной самоорганизации и учета нелинейности иерархически организованных систем, роли нелинейных волн и пластической деформации в разрушении твердых тел [Панин и др., 2012]. Нельзя не увидеть здесь попыток учета реальных физических процессов в геосреде и ее реальной блочно-иерархической структуры. Понятно, что наличие пространственно-иерархической структуры дефектов литосферы определяет существенную неоднородность полей напряжения разного масштаба и оказывает влияние на способ и величину диссипации накопленной упругой энергии.

На основе этих представлений предприняты попытки построения новой обобщенной модели развития сейсмического процесса (очага землетрясения) как результата эволюции дефектов геосреды на различных масштабных уровнях в поле внешних напряжений, позволяющей описать основные способы релаксации напряжений массивами горных пород: хрупкое крупномасштабное разрушение и катакластическое деформи-

рование, являющихся следствием коллективного поведения дефектов [Пантелеев и др., 2013]. Теоретически обосновано предположение о возникновении локализованных диссипативных структур с обострением в локализованной пространственной области, уменьшающейся с течением времени — очага хрупкого разрушения. При этом любое макроскопическое разрушение есть необходимый катастрофический этап эволюции геосреды — режим с обострением на соответствующем пространственно-временном масштабе [Марков, 2011].

По мнению авторов [Пантелеев и др., 2013], эта модель подготовки потенциального очага землетрясения соответствует и является формализованным обобщением лавинно-трещинной модели [Мячкин и др., 1975], однако приближенной в направлении учета реального строения геосреды, которая отличается от классических моделей сплошной среды структурой и постоянным расходом поступающей извне энергии.

Предпримем попытку конкретизации некоторых аспектов проблемы механики очага сейсмического события, опираясь на результаты цитируемых выше работ. Очевидно, в соответствии с этими результатами очаг можно определить как область локализации пространственно-временных сильнонеравновесных состояний, деформаций и повреждений, формирования деформационных фронтов различных масштабов, волн повреждений и разрушения, являющихся результатом эволюции иерархически структурированной нелинейной многоуровневой динамической системы (геосреды) с самоорганизованной критичностью. Предполагается, что непосредственно перед образованием крупномасштабной разрывной структуры в земной коре формируется некая специфическая первичная структура, состоящая из локальных прочных образований и областей сдвиговой ползучести, а квазихрупкому разрушению предшествуют интенсивные вязкопластические процессы и образование фронтов дефектности. Отсюда непосредственно следует актуальность изучения зон локализованной пластической деформации, развитие которых непосредственно предшествует разрушению [Макаров, 2011; Панин и др., 2012; Пантелеев и др.,

2013]. Важность этого результата очевидна: завершающая стадия разрушения обнаруживает черты, характерные для поведения нелинейных систем в окрестности критических точек, а выполнение масштабно-инвариантных закономерностей развития сейсмического процесса является следствием автомодельного характера поврежденности на завершающей стадии разрушения [Пантелеев, 2010].

При этом автомодельность процессов накопления неупругих деформаций (повреждений) во всей иерархии масштабов обуславливает качественное подобие сценариев разрушения независимо от масштабов деформационного процесса и геологических свойств среды [Макаров, 2011], а саморазрушение связано с волновым структурно-фазовым распадом материала геосреды. Каналированное распространение трещин в многоуровневых системах также развивается как нелинейный волновой процесс.

Таким образом, любое макроразрушение — это режим с обострением на соответствующем масштабе и физически означает прорыв разрушения с меньших масштабов на большие, а начало интенсивной подпитки локальной области деформационными фронтами можно считать началом режима обострения. Ясно, что он должен сопровождаться всплесками, нарушением стационарного режима сейсмоакустической и электромагнитной эмиссий, формированием зон «затишья» — сравнительно низкоамплитудного непрерывного квазистационарного процесса нарастания деградации в локальной зоне формирующегося очага. Именно это обстоятельство вселяет оптимизм в плане обоснования поисков физических предвестников катастроф и перевода их в практическую плоскость.

Разумеется, энергетическая и флюидная подпитки системы вызывают увеличение ее неравновесности и неустойчивости, что ведет к формированию флуктуаций. Слабый шум, присущий всякой реальной системе, усиливается, формируется резонанс на нулевой частоте. Приближение к бифуркации стационарного режима системы отражается в нарастании низкочастотных мод в спектре ее шумов.

Очевидно, приведенные соображения о формировании очага все же следует ограничить коровой частью литосферы. Как известно, при моделировании напряжений и деформаций крупных тектонических объектов обычно используют тело Кулона—Мора для горных пород хрупкой части земной коры и тело с нелинейной ползучестью для горных пород в пластической ее части и в подкоровой литосфере. И здесь физика сильных разрушений представляется более-менее понятной. Модель поведения геосреды с дефектами в поле внешних напряжений, отличающейся предельной энергонасыщенностью, собственной динамикой и изменением параметров на разных масштабных уровнях, в принципе позволяет описать основные способы релаксации напряжений массивами горных пород. Это — хрупкое крупномасштабное разрушение и катакластическое деформирование, являющиеся следствием коллективного поведения дефектов, определяемого величиной структурного скейлинга [Пантелеев и др., 2013]. Тем не менее эта модель все же остается весьма «механистической». В ней не конкретизируются движущие силы процесса, практически не рассматривается природа слабой сейсмичности и повторяемости крупномасштабных разрывов в одних и тех же местах, реализующихся в граничных структурах. Их цикличность так же остается открытой, на что обращено внимание в работах [Гуфельд и др., 2011; Гуфельд, 2013а]. По мнению И. Л. Гуфельда, это означает, что суть сейсмического процесса должна быть иной, иметь другой физический смысл. В частности, важная особенность геосреды, которая не моделируется при нагружении монолитных образцов в лабораторных экспериментах — это быстрые и разномасштабные вариации объемно-напряженного состояния, интерпретируемые в качестве реакции геосреды на взаимодействие восходящих потоков легких газов (водород, гелий) с твердой ее фазой [Гуфельд, 2007]. Существенно, что газонасыщенная геосреда допускает проявление процессов, которые не реализуются в иных условиях. В определенной степени можно говорить об определяющей роли водородной дегазации в формировании особенностей структуры литосферы. При этом любая

локализованная по глубине ее зона при взаимодействии с восходящим потоком легких газов будет испытывать вариации объема: сжатие—растяжение. Фактически можно говорить о режиме деформационной волны, распространяющейся в направлении потока легких газов при его модуляции [Гуфельд, 2013]. Сток легких газов из разнесенных по глубине трещиноватых зон блоковых структур в межблоковые ослабленные зоны может быстро менять сейсмические ситуации от фоновых до критических. Декомпрессия разломной зоны под влиянием или воздействием внешних факторов вызывает взрывной распад соединений гелия и водорода с выделением энергии высокой плотности. Имеются весомые основания предполагать, что декомпрессия и дегазация и сопровождающие их деформационные фронты, сходящиеся в области формирующегося очага наряду с наличием медленной динамики (динамических скоррелированных процессов, существенно более медленных, чем волны напряжений), вносят значительный вклад в формирование крупномасштабного разрыва. При этом, если создать условия каналированного распространения трещины и максимально локализовать эффекты диссипации, трещина будет распространяться как нелинейный волновой процесс.

Сейсмоакустическая и электромагнитная эмиссии литосферы и возможные предвестники активной стадии разрушения. Как известно, представление об активных средах, характеризующихся распределенным ресурсом энергии, вещества и информации, автоволновым механизмом самоорганизации и способных, в силу специфики структуры и внутренних взаимодействий, формировать регулярные во времени и пространстве структуры, были привнесены в геофизику в 1960-е годы из физики лазеров. Было показано, что любое разрушение твердого тела (и хрупкого, и пластического), как и сам сейсмический процесс, является результатом эволюции многомасштабной иерархически организованной нелинейной динамической системы [Макаров, 2011]. В рамках таких представлений наблюдаемые вариации геофизических полей могут интерпретироваться в качестве проявления бифуркаций в геосреде при ее переходе

из одного состояния в другое или, конкретнее, в качестве проявления детерминированного хаоса в иерархически структурированной фрактальной среде. При этом эмиссионное сейсмоакустическое и электромагнитное излучение является отражением собственной эволюции геосреды, а его спектр отражает стадию этой эволюции.

Одна из моделей описания флуктуаций сейсмоакустической и электромагнитной эмиссий в процессе перестройки структуры пород под воздействием восходящих потоков легких газов связана с перколяционной моделью диффузионного фронта. При этом отмечается, что модель фронта градиентной, скалярной перколяции внедрения позволяет дать физическую интерпретацию наблюдаемых параметров высокочастотного спонтанного шума как неравновесного самоорганизованного явления [Гийон и др., 1991]. Существенно, что эксперимент допускает автоволновую трактовку происходящих в геосреде процессов, типичность их хаотического поведения, демонстрирует стабильную во времени картину пространственного распределения энергии сейсмических и электромагнитных шумов литосферного происхождения и возможность локализации их источников [Чеботарева, 2011; Шуман, 2014а]. При этом каждый из элементов системы генерирует последовательность импульсов возбуждения с различным интервалом следования. Весьма вероятно, что сейсмоакустический и электромагнитный шумы могут быть истолкованы в терминах автоколебаний, поддерживаемых внешними источниками энергии в нелинейной диссипативной системе (геосреде), вид и свойства которых определяются самой системой [Дмитриевский, Володин, 2006]. При этом достаточно располагать источником энергии, чтобы самовозбуждение колебаний стало возможным, а самообразование пространственно-связанной структуры блоков в значительной степени зависит и определяется интенсивностью и скоростью процессов дегазации, а также уровнем внешних полей и шумов в данный период времени. Следует также предусмотреть возможность различного физического содержания автоволновых процессов на разных уровнях геометрически са-

моподобной блоковой системы, в частности генерации связанных акустоэлектромагнитных возбуждений в диапазоне Гц—нГц [Дмитриевский, Володин, 2006]. Заметим также, что в соответствии с флуктационно-диссипативной теоремой физики явление генерации геометрического (акустосейсмоэлектромагнитного) шума — это универсальный эффект. Он обусловлен только наличием диффузии и может проявляться при генерации возмущений различной природы. Понятно, что использование лишь классических подходов к механизмам генерации и распространение возмущений в реальных средах (литосфере) не всегда информативно и целесообразно в смысле понимания физики происходящих в геосреде динамических процессов и их прогноза.

Как уже отмечалось, начало интенсивной подпитки локальной области деформационными фронтами, обусловленными в том числе и импульсными потоками легких газов на разных пространственных и временных масштабах геосистемы при максимальной локализации диссипации, в определенном смысле можно считать началом режима обострения и перехода разрушения (формирования крупномасштабного разрыва) в катастрофическую стадию. При этом наличие локальных зон затишья и формирования локализованных диссипативных структур обострения (медленных деформационных фронтов и волн), по мнению П. Макарова [Макаров, 2011], можно считать надежным предвестником формирования очага как зоны локальных структурных превращений. Предполагается, что непосредственно перед образованием крупномасштабной разрывной структуры в некотором объеме геосреды образуется специфическая первичная структура — зона неравновесных состояний, состоящая из прочных областей и области сдвиговой ползучести.

Как известно, главный физический процесс на движущихся фронтах состоит в рождении энтропии. Существенно, что генерируемые и излучаемые из этих областей (деформационных, диффузионных фронтов) сейсмоакустические и электромагнитные возмущения могут быть зарегистрированы экспериментально.

Экспериментально установлено, что при приближении к критической точке (точке бифуркации) начинает быстро расти время релаксации флуктуаций системы и радиус их корреляции. При этом основную роль начинают играть крупномасштабные флуктуации, чей рост происходит на фоне увеличения восприимчивости системы к разного рода внешним воздействиям (возмущениям) [Руманов, 2013].

Напомним, что восприимчивость — это отношение амплитуд изменения состояния системы и состояния системы. Слабый шум, присущий всякой реальной системе, усиливается. В итоге появляется возможность говорить о приближении к точке бифуркации стационарного режима по нарастанию низкочастотных мод в спектре шумов системы. В этом контексте имеются весомые основания обратить внимание на такой существенный недостаток имеющихся теорий прогноза сейсмичности, как игнорирование или недооценка шумов в исследуемой геосистеме, процессов синхронизации автоколебаний в ее подсистемах (кластерной синхронизации), в том числе синхронизации, индуцированной шумом. С этой точки зрения представляется естественным исследование отклика блочной геосистемы на многочастотные и шумовые воздействия. Возникает возможность осуществления мониторинга геосистемы, варьируя частоту внешнего воздействия в зависимости от амплитуды колебаний. Следовательно, эффективный мониторинг текущего ее состояния может быть реализован на основании индекса возбудимости геосистемы, который и определяет меру возбудимости колебаний или движений в ней [Фрадков, 2005]. Важно, что индекс возбудимости может быть измерен экспериментально подобно тому, как измеряется обычная частотная характеристика линейной системы. Однако, в отличие от измерения частотной характеристики, когда на вход системы подается гармоническое воздействие с постоянной амплитудой и изменяющейся частотой, при измерении характеристики возбудимости изменяется амплитуда (уровень) входного сигнала, при этом сам сигнал (импульс возбуждения) задается в виде обратной связи [Фрадков, 2005].

Разумеется, это подразумевает контролируемое воздействие на систему внешним и, возможно, достаточно мощным источником практически в непрерывном режиме эксперимента, что на практике может оказаться весьма проблематичным или трудно реализуемым. Ситуация усложняется тем обстоятельством, что в сложных динамических нелинейных системах, к числу которых может быть отнесена и геосреда, необходимо осуществлять такой мониторинг и контроль на иерархических уровнях их организации, что весьма непросто. Однако на практике в ряде случаев эта процедура не является необходимой, если вспомнить о наличии шумов в любой реальной системе: с приближением к точке бифуркации наблюдается возрастание времени релаксации флуктуаций и их радиус корреляции, причем этот максимум в спектре ее шумов (резонанс на нулевой частоте по терминологии Э. Руманова), в отличие от фликкер-шума, быстро исчезает при удалении параметров системы от критических. Заметим также, что фликкер-шум монофрактален. При этом форма распределения энергии по частотам

$$S(f) \sim f^{-b},\ \beta \approx 1$$

указывает на возможность появления в системе гигантских флуктуаций и долговременный прогноз поведения системы в этом случае становится невозможным [Малинецкий, 1998].

Заметим, что в реальности процессы в геосреде мультифрактальны, т.е. допускают разложение на участки с различными локальными свойствами скейлинга ($\beta \neq const$), что, вообще говоря, осложняет мониторинг и диагностику поведения низкочастотных мод в спектре ее шумов.

Таким образом, предельно ясно, что мониторинговые исследования должны вестись на комплексной методической основе, учете активной роли геосреды и особых ее динамических состояний, масштабно-инвариантных закономерностей развития сейсмических событий с инициированием диссипативных структур обострения, в том числе порождаемых кооперативным поведением ее подсистем. Очевидно, к такой постановке мониторинговых наблюдений мы все еще не готовы. До сих пор

все еще предполагается, что наибольшее значение для поиска предвестников крупномасштабного разрушения имеют исследования в приповерхностном слое земной коры, в эпицентре события. Но, как известно, поверхностный слой земной коры не нагружен. На него оказывают сильное влияние внешние источники. В итоге исследование деформационных процессов в этом приповерхностном слое весьма слабо и опосредственно отражает распределение деформаций, связанных с накоплением и релаксацией напряжений во внутренних частях геосреды. Согласно И. Гуфельду [Гуфельд, 2011, 2013а], поверхностный слой связан с глубинными процессами только через разгрузку природных газов, а не с процессом формирования крупномасштабных структур разрушения. В итоге в условиях неоднородной иерархически блоковой структуры земной коры поиск каких-либо косвенных признаков прогноза сейсмичности в этом раздробленном и ненагруженном слое вряд ли целесообразен и эффективен. Мало эффективными оказались и методы спутникового мониторинга: «… за тридцать лет спутникового мониторинга ионосферной плазмы не обнаружено аномалий, которые можно было бы отнести к предвестникам (ситуация аналогична результатам поиска литосферных предвестников)» [Гуфельд, 2011]. Следовательно, можно предположить, что хотя в основе мониторинга сейсмичности и присутствует широкий спектр геофизических и гидрогеохимических методов, методов анализа сейсмичности в пространстве, спутникового мониторинга земной поверхности и приземной атмосферы, в частности инфракрасного излучения с целью обнаружения эффектов разгрузки литосферы природными газами, как и методы мониторинга в приповерхностном слое являются косвенными и в известной степени неадекватными задачам прогноза динамики и состояния геосреды. В столь сложной ситуации на передний план, как уже упоминалось, выходят методы активного мониторинга геосреды, включая контроль ее активности (возбудимости), поиска эффектов синхронизации и ее разрушения, изучение баланса притока, оттока и внутреннего производства энтропии, роли запаздывания в синхронизации автоколебаний,

использование и развитие специальных средств наблюдения и анализа данных с целью получения такой информации. Проблема, однако, состоит в том, что ее получение в реальной геосреде весьма непросто, требует постановки специальных мониторинговых наблюдений, к чему геофизики не вполне готовы.

Самоорганизация и энтропия. В предыдущих разделах внимание было сосредоточено на одной из важнейших с точки зрения приложений характеристик равновесия в геосистеме — ее восприимчивости. В частности, отмечалось, что критические явления в системе обусловлены восприимчивостью, а синхронизация означает приближение к критическому событию. Однако в значительной степени остались «за кадром» такие важные вопросы, как роль энтропии в открытых системах, связь негентропии и информации, приложения выводов этой теории к изучению геосистем и прогнозу их поведения.

Как известно, именно приток негэнтропии (энтропии с обратным знаком, отрицательной энтропии) поддерживает систему в неравновесном состоянии [Изаков, 1997]. Этот приток является мерой всех физико-химических диссипативных процессов, происходящих в исследуемой системе. Поток энтропии состоит из кондуктивной, конвективной и диффузионной частей. При этом изменение энтропии открытой системы ds определяется ее изменением за счет притока из окружающей среды (например, низов литосферы) ds_e и ее увеличения за счет внутренних диссипативных процессов ds_i [Изаков, 1997, с. 1088]:

$$ds = ds_e + ds_i ,$$

где $ds_i > 0$, а ds_e может иметь любой знак, т. е. может быть как приток, так и отток энтропии. В стационарном неравновесном состоянии приток негэнтропии равен производству энтропии в системе. Вопрос, однако, состоит в том, что производство энтропии в столь сложной системе, как реальная геосреда, рассчитать крайне сложно.

Напомним в этой связи, что в настоящее время для определения термина «энтропия» используется ряд характеристик, для которых он употребляется. В частности, энтропия может

быть определена как логарифм фазового объема системы [Мартынов, 1996, с. 1126]. Абстрактным аналогом энтропии может выступать функция Ляпунова — функция состояния системы [Фрадков, 2005, с. 119]. Из соотношений для энтропии следует, что эта величина служит мерой экспоненциального разбегания траекторий динамической системы.

Важно, что энтропию динамической системы, в принципе, можно определить по измеряемым величинам. Но даже для относительно простых физических систем, не говоря уже о геосреде, не всегда удается найти адекватную математическую модель анализируемой открытой диссипативной системы.

Пусть некоторая открытая динамическая система получает извне некоторую упорядоченную энергию (в случае геосреды — с тепловым потоком из низов литосферы) с мощностью P. Тогда, если температура системы равна C, а поступающая энергия имеет энтропию, которую можно характеризовать эффективной температурой C_{eff}, то поток негэнтропии равен

$$-S_i = P\left(\frac{1}{C_{\text{eff}}} - \frac{1}{C}\right).$$

Другими словами, если имеется поток тепла, то это значит рождение энтропии [Изаков, 1997]. Но при этом с точки зрения экспериментальных приложений актуален следующий вопрос: получим ли мы при таком рассмотрении новую информацию о системе, ее состоянии и прогнозе развития? Очевидно, в первую очередь можно надеяться на определенный прогресс в понимании процессов самоорганизации в системах, в частности неравновесных с множеством самоорганизующихся структур, роли негэнтропии, связи негэнтропии и информации. Так, если энтропия — это величина, характеризующая меру неупорядоченности системы, то она естественно оказывается связанной с понятием предсказуемости (горизонт прогноза) T поведения системы: на практике $T \sim K^{-1}$, где K — энтропия. Далее, установлена прямая связь между негэнтропией и количеством информации (информация численно равна негэнтропии) [Изаков, 1997, с. 1090].

Как уже отмечалось, имеются весомые основания предполагать, что в процесс формирования очага будущего разрушения важный вклад вносят деформационные фронты, концентрирующиеся и стекающиеся в этот очаг. Но, как известно, главный физический процесс, происходящий на распространяющихся фронтах самоорганизованной критичности, состоит в рождении энтропии. В итоге в зоне возможного очага будет наблюдаться быстрый рост воспроизводства энтропии. В момент сейсмического события геосистема интенсивно выделяет энергию, происходит быстрый сброс энтропии очагом. Затем возможно повторение цикла.

Следовательно, рассмотрение геосреды как открытой диссипативной системы, управляемой не только притоком энергии, но и информации, дает дополнительные возможности понимания самоорганизации сложных иерархически организованных геосистем, их приспособление к изменяющимся условиям в окружающей среде. И, наконец, напомним, что все процессы на планете Земля идут за счет притока негэнтропии, в частности возникающего по причине того, что солнечная радиация, приносящая на планету энергию, имеет температуру порядка 6000 К, а уходящая с ее поверхности инфракрасная радиация, уносящая в единицу времени примерно ту же энергию, имеет много меньшую температуру. В итоге она уносит много большую энтропию, компенсируя таким образом энтропию, произведенную во всех диссипативных процессах на планете [Изаков, 1997]. На этом фоне поток тепла из ее недр на земной поверхности, составляющий порядка 90 мВт/м^2, оказывается пренебрежимо малым по сравнению с радиационным потоком от Солнца, что накладывает известные ограничения на возможности космического мониторинга на основе регистрации уходящего ИК-излучения, хотя с космических аппаратов и обнаруживаются его стационарные и нестационарные аномалии.

Заключение. Подытожим основные результаты и выводы проведенного рассмотрения. Развитие теории динамических систем во второй половине XX в. привело к важным следствиям не только в физике и математике, но и геофизике. Своеобразие

нынешнего этапа исследований — формирование взглядов на геосреду как открытую иерархически неоднородную нелинейную систему и активное привлечение к ее изучению идей и принципов нелинейной динамики. При этом вариации геофизических полей интерпретируются в качестве проявления детерминированного хаоса в такой иерархически структурированной фрактальной среде. Открытость, нелинейность, когерентность (кооперационное взаимодействие элементов и подсистем геосреды на различных пространственных уровнях) — основные исходные предпосылки к ее изучению. При этом геосреда может рассматриваться как иерархия подсистем с различной нелинейностью, а развитие катастрофических событий реализуется лишь при согласованном поведении ее подсистем. Проявление колебательных движений — одна из форм диссипации поступающей энергии, а их спектр характеризует меру энергонасыщенности геосистемы.

Установлено, что разрушение твердых тел (и хрупкое, и пластическое), как и сам сейсмический процесс, является результатом эволюции геосистемы. Эксперимент дает весомые основания для предположения об автоволновом характере деформационных процессов в геосреде. При этом нелинейная динамика, очевидно, окончательно развеяла наши иллюзии относительно «глобальной предсказуемости» сейсмического процесса. Стало предельно ясно, что сейсмичность и сейсмический процесс тесно связаны с решением ключевых проблем в физике и механике разрушения. И хотя к настоящему времени в основном построена теория бифуркаций многомерных динамических систем, достаточно продвинута теория перехода от детерминированного поведения к хаотическому (к примеру, теория русел и джокеров), выполнены исследования нелинейных волн (автоволн) и локализованных состояний во многих пространственно-распределенных системах, выбраться из всего этого многообразия представлений, подходов и трактовок с точки зрения приложений не так-то просто. С этой точки зрения отнюдь не кажется странным то обстоятельство, что хотя во многих работах этого цикла, даже вышедших в самые последние годы, и

подчеркивалась или декларировалась ключевая роль нелинейно-динамического подхода при описании сейсмического процесса, его аппарат, как правило, использовался слабо, фрагментарно, формально и несистематически. Остро ощущается недооценка прямого экспериментального изучения с позиций нелинейной динамики реальной геосреды, а не лабораторных образцов. В частности, существующие методы мониторинга, как правило, не были ориентированы и не давали необходимой информации о строении геосреды и протекающих в ней процессах.

Очевидно, важным и актуальным является вопрос об экспериментальном исследовании эффектов синхронизации в таких системах со сложной динамикой, изучение влияния шумов на синхронизацию. Сюда могут быть отнесены, в частности, вопросы экспериментального исследования перемежающегося поведения вблизи границы синхронизации в присутствии шума, изучение влияния шумов на порог установления синхронизации колебаний, исследования синхронизации временных масштабов и влияние шума на этот тип хаотической синхронизации.

Установлено, что с приближением к сильному сейсмическому событию происходит аномальный рост флуктуаций, критическое замедление, рост корреляционных длин. Индивидуальное поведение структурных элементов (подсистем) геосреды становится менее значимым, в отличие от коллективных эффектов, охватывающих все пространственно-временные масштабы системы и преобладающих в области формирования очага (крупномасштабного разрыва). Очевидно и весьма вероятно, что в отсутствие теории указанные общие соображения могут служить минимальной основой для постановки мониторинговых наблюдений.

Заметим, что такие предвестники сильных событий, как нарастание низкочастотных мод в спектре шумов системы [Романов, 2013] или поведение коэффициентов множественной синхронизации мультифрактального спектра сингулярности [Любушин, 2011б], — частные проявления отмеченных закономер-

ностей. Здесь уже отчетливо просматриваются существенные отличия от классических представлений первой половины XX в., когда не без оснований считалось, что геофизические поля являются индикаторами процессов, протекающих в геосреде, параметры горных пород, слагающих земную кору, функционально или корреляционно связаны с их составом и структурными особенностями, а пространственно-временное распределение и временные изменения геофизических полей несут непосредственную информацию о пространственно-временных изменениях геосреды. Очевидно, что эти представления, не учитывающие возможности изменения свойств геосреды под влиянием происходящих в ней процессов, игнорирующих ее нелинейные свойства, автоволновую и резонансную природу процессов, большую, а иногда и определяющую, роль малых возмущений, структуру и способ организации ее элементов, интенсивное взаимодействие эмиссионных и внешних полей, носят весьма ограниченный характер и не могли дать положительных результатов в задаче прогноза сейсмического процесса.

Что же привнесли новые подходы к его описанию и прогнозу с прагматической точки зрения? Несмотря на пестроту и разнообразие подходов, они могут быть объединены в некоторый единый смысловой кластер. Прежде всего, это тот уже общепризнанный факт, что геосреда как нелинейная динамическая система обладает свойством самоорганизованной критичности, а сам сейсмический процесс является результатом ее эволюции как многомасштабной иерархически организованной системы [Шаповал, 2011]. Установлено, что прогноз сейсмичности в реальном времени не противоречит саморганизованной критичности сейсмического процесса, по крайней мере, представление о его самоорганизации согласуется с предсказуемостью сильных событий.

Теоретически и экспериментально обоснована концепция многоуровневого описания деформируемого твердого тела как нелинейной иерархически организованной системы, которая может быть описана в рамках нелинейной динамики и неравновесной механики [Панин и др., 2012]. Это дало необходимую

физическую основу для построения эволюционной концепции процессов деформации и разрушения твердых тел и, в частности, описания механизмов формирования возможных очагов будущего разрушения [Макаров, 2011]. Заметим, что традиционный критериальный подход феноменологической макроскопической механики разрушения, основанной на макроскопическом масштабе усредненного описания геосреды, в принципе не способен решать проблему прогноза разрушения, так как геосреда — многомасштабная система [Макаров, 2011]. И, наконец, это серия работ И. Гуфельда, в которых предпринята попытка конкретизации движущих сил сейсмического процесса, природы слабой сейсмичности и повторяемости крупномасштабных разрывов в земной коре в рамках концепции взаимодействия восходящих потоков легких газов с твердой фазой литосферы.

Очерчены контуры, возможности, задачи и методы геофизического мониторинга [Любушин, 2011б; Гуфельд, 2011, 2013а; Руманов, 2013], основой которого может быть только понимание физических процессов, протекающих в литосфере. Наличие зон затишья (затухание деформационного процесса ниже некоторого определенного уровня) и формирование диссипативных структур (цугов медленных деформационных фронтов) можно считать надежными предвестниками активной стадии формирования очага. Важно, что и сейсмоакустическая, и спонтанная электромагнитная эмиссии обладают характерными свойствами нелинейного процесса, способностью к периодической самоорганизации и хаотизации, характерному поведению при приближении к событию. Очевидно, это не так мало для понимания существа дела и дает реальные основания для оптимизма при поисках предвестников сейсмических событий, по крайней мере, в плане прогноза краткосрочной сейсмической опасности.

Нелинейная динамика геосреды: переходные процессы и критические явления

Геофизический журнал,
№ 6, Т. 36, 2014, С. 129—142.

Введение. В настоящее время нелинейная динамика как математическая теория эволюции динамических систем в значительной степени расширила свои рамки и описательные возможности, в том числе и в многочисленных приложениях к задачам наук о Земле. В частности, в рамках сформировавшихся взглядов на геосреду как открытую иерархическую неоднородную нелинейную динамическую систему, идеи и методы нелинейной динамики послужили основой для постановки и решения ряда актуальных вопросов физики, особенностей и механизмов формирования очагов разрушения в земной коре, прогноза и прогнозируемости сейсмического процесса, генерации спонтанного сейсмоакустического и электромагнитного шума, получения информации о свойствах геосреды, особенностях строения и условиях ее деформирования.

Разумеется, центральной проблемой в рассматриваемом контексте является проблема изучения закономерностей формирования очагов разрушения в земной коре с целью прогноза координат и времени катастрофических событий (землетрясе-

ний). При этом сама эволюционная природа и свойства режимов геосистем стимулируют привлечение методов нелинейной динамики.

Получила существенное развитие сама нелинейная динамика. Центр ее интересов сместился в область исследования сложных динамических систем. Новая парадигма нелинейной динамики — теория самоорганизованной критичности — привела к переоценке взглядов на динамику иерархических систем [Макаров, 2012].

Как известно, свойством самоорганизованной критичности обладают только многомасштабные иерархически структурированные системы, к которым относится и геосреда — открытая диссипативная динамическая система, способная к самоорганизации. При этом ключом к пониманию сути сложных явлений и процессов является диссипативность и нелинейность динамической системы.

Характерные особенности решений уравнений нелинейной динамики — аттракторы, хаотическое поведение, бифуркации, самоорганизованная критичность, наличие медленной динамики, режимов с обострением и др. [Макаров, 2012].

В основном построена теория бифуркаций многомерных динамических систем, с достаточной полнотой изучена теория перехода от детерминированного поведения к хаотическому, проведено исследование нелинейных волн и локализованных состояний во многих пространственно-распределенных системах [Некоркин и др., 2008].

Теоретически и экспериментально обоснована концепция многоуровневого описания деформируемого твердого тела как нелинейной иерархически организованной системы [Панин и др., 2012]. Сформулированы ключевые идеи и на качественном уровне обоснованы представления об особенностях неупругого деформирования и последующего разрушения «пластичных» и «хрупких» сред [Макаров, 2012]. Отмечается, что любой прогноз разрушения в принципе невозможен без учета многомасштабной иерархической природы процесса разрушения [Макаров, 2012]. Установлено, что для сложных иерархических систем типичным являются:

– коррелированное поведение их подсистем;

– самоорганизованный характер критичности;

– наличие длинных причинно-следственных связей.

Появились работы, анализирующие решения уравнений механики деформируемых твердых тел [Даниленко, 2010].

Автомодельность — важная особенность эволюции деформируемых нелинейных систем в случае коррелированного поведения их подсистем.

Имеются весомые основания предполагать, что такая сложная динамическая система, как геосреда, которая упорядочивает себя в зависимости от скорости, с которой поступают энергия и вещество, может быть представлена в виде автоколебательной системы, в которой реализуются нелинейные процессы как в пространстве, так и во времени. При этом акценты современной теории автоколебаний также сместились в сторону более сложных, в том числе хаотических колебаний, в основу которой положены следующие динамические принципы [Некоркин и др., 2008]:

– исследование структурно-устойчивых систем и явлений, поведение которых устойчиво к малым вариациям параметров;

– анализ структуры разбиения фазового пространства системы;

– исследование эволюции колебательно-волновых процессов, выявление бифуркаций, определяющих принципиальную перестройку этих процессов [Лоскутов, 2013].

Подвергается существенной переоценке роль хаоса в процессах эволюции нелинейных сложных систем. Во-первых, хаос необходим для вывода системы на один из возможных аттракторов. Во-вторых, хаос лежит в основе механизмов объединения более простых структур в сложные. И, в-третьих, хаос может выступать в роли механизма смены режимов системы. Заметим, что здесь следует отличать детерминированный хаос, математическим образом которого служит странный аттрактор, от стохастических процессов в классическом смысле, которые для своего описания требуют учет флуктуаций в переходных динамических уравнениях либо непосредственно подчиняются

уравнениям для плотности распределения вероятностей статистической теории.

Отмечается возрастающий интерес к задачам прогностической реконструкции (построению параметризованных математических моделей) систем, порождающих наблюдаемые переходные процессы (сейсмический, сейсмоакустический, электромагнитный и др.) [Лоскутов, 2013].

Установлена важная особенность коллективных процессов и явлений в сложных динамических системах. В их поведении весьма отчетливо проявляются аналогии, свидетельствующие о наличии общих принципов их эволюции независимо от микроскопической природы. Это обстоятельство послужило основой для разработки некой типовой схемы реконструкции уравнений их динамики. В частности, предложены и получили развитие два способа построения прогностических моделей их эволюции:

– на основе уравнений движения, уравнений для силовых полей и др.;
– эмпирических моделей динамических систем, построенных на основе прямого анализа наблюденных данных [Лоскутов, 2013].

При этом большую роль в описании поведения системы играет геометрическое представление ее эволюции «в целом», т. е. в терминах аттракторов, переходных состояний, устойчивости, бифуркаций, динамического хаоса и др. Основной элемент такого исследования — прослеживание фазового портрета и его изменений при непрерывном изменении параметров модели вдоль некоторой кривой в пространстве параметров.

Заметим, что с позиций математики бифуркация — это смена топологической структуры разбиения фазового пространства динамической системы. Точки бифуркации или структурно-фазовых переходов являются ключевыми, так как в них гармонизируются адаптивность и динамическая устойчивость сложной системы в процессе эволюции при изменяющихся внешних условиях притока энергии. Качественно перестройка фазового портрета представляется бифуркацией, а установившееся движение — аттрактором.

Предложены фундаментальные теоретические идеи и методы, обосновывающие типовые схемы реконструкции уравнений динамики. В частности, при выборе структуры уравнений — это теоремы Такенса для восстановления значений вектора состояния системы и обобщенной аппроксимационной теоремы для задания оператора ее эволюции [Лоскутов, 2013] при оценке параметров — минимизация различных целевых функций, а при проверке адекватности модели — расчет метрических и топологических характеристик аттрактора.

Тем не менее в геофизической практике получить удовлетворительную модель процесса, в частности сейсмического, с помощью существующих универсальных подходов все еще не удается. Очевидно, трудности моделирования геосистем связаны, в первую очередь, с их необычностью и сложностью, проблемой выбора удобных для измерений и достаточных для динамического описания переменных, их адекватного усреднения и абстрагирования от деталей. Не существует и оптимального рецепта построения пространства динамических переменных эмпирической модели по пространственно-распределенным экспериментальным данным. В то же время их удачный набор и предопределяет эффективность эмпирической модели, поскольку тем самым задается проекция ее аттрактора, на которой и строится оператор эволюции. Очевидно, оптимальность такого выбора и является ключевой проблемой эмпирического моделирования распределенных динамических систем.

Проблема, которая при таком подходе требует особого внимания, — это выбор удобных для измерений и достаточных для динамического описания переменных. Такие конструкции в настоящее время активно развиваются многими специалистами по нелинейной динамике. Однако стали вырисовываться и пределы применимости этих подходов. Во-первых, размерность динамических систем должна быть не очень большой и, во-вторых, характерные временные масштабы в исследуемых системах не должны очень сильно различаться. В итоге, несмотря на обилие математических моделей в данной области, их возможности при расширении задач прогноза весьма ограничены.

Воспользоваться сложившейся типовой схемой реконструкции уравнений динамики, исследования фазового пространства системы и пространства параметров модели с целью получения информации о поведении системы, предсказать ее возможные бифуркации в геофизической практике пока не удается.

Развитие и адаптация соответствующих алгоритмов применительно к прогнозу сейсмических событий были реализованы в Международном институте математической геофизики и теории прогноза землетрясений РАН. В этом контексте, очевидно, следует упомянуть регулярно обновляемый уже на протяжении 25 лет среднесрочный прогноз на основании алгоритмов M8 и MSc.

Как известно, алгоритм M8 основан на анализе текущих данных каталогов землетрясений и нацелен на обнаружение совокупности аномалий сейсмичности заданного вида, а алгоритм MSc служит для уточнения пространственной области грядущего события [Левин и др., 2011].

Установлено, что в рамках типичных систем с самоорганизованной критичностью существует модель сейсмического процесса, крупные события которой эффективно прогнозируемы с помощью адаптированных предвестников сильных землетрясений [Шаповал, 2011].

Показано, что предвестники сильных землетрясений достаточно универсальны. Но, как следствие этой универсальности, соответствующие алгоритмы прогноза обладают определенной ограниченностью в их использовании без необходимой детализации [Шаповал, 2011]. В итоге проблема прогноза сильных землетрясений оказалась существенно более сложной, чем это предполагалось еще несколько лет назад, а соответствующие алгоритмы — недостаточными для реального практического применения [Гуфельд, 2013а]. И хотя вытекающие из теории самоорганизованной критичности следствия и алгоритмы не привели к конкретным результатам, они способствовали пониманию сложности проблемы и послужили основой для создания более совершенных и адекватных природным ситуациям моделям [Любушин, 2011а; Пантелеев и др., 2012; Состояние…., 2013].

Заметим, что подход А. А. Любушина основан на выявлении скрытых признаков роста синхронизации сейсмических шумов (в частности, на анализе коэффициентов множественной синхронизации мультифрактального спектра сингулярности).

Работа [Пантелеев и др., 2012] посвящена рассмотрению ключевых вопросов физики и механики разрушения с целью моделирования процесса формирования потенциального очага землетрясения.

Тем не менее до настоящего времени сейсмология и прогноз сейсмичности переживают сложный период. Детали сейсмического процесса все еще не изучены с достаточной полнотой, не существует и его общепризнанной механической модели. Существует мнение о безысходности представлений о сейсмическом процессе [Гуфельд, 2013а]. При этом в связи с неудачей многочисленных попыток прогноза кажется естественным вопрос: действительно ли существует принципиальная возможность его реализации с необходимой точностью? Согласно весьма распространенным представлениям, он в принципе возможен, по крайней мере в вероятностном понимании [Родкин, 2008]. Иначе говоря, тезис о непредсказуемости не отвечает реальной ситуации: теоретически невозможный прогноз оказался отчасти реализованным на практике, хотя предикторы, обладающие определенной надежностью, могут быть получены, очевидно, лишь из теоретических представлений о физике процесса. При этом в качестве основной задачи становится краткосрочный прогноз эпицентральной области сильных сейсмических событий. Однако реальность и возможность решения этой задачи остаются весьма дискуссионными. Так, согласно [Короновский, Наймарк, 2013], имеющиеся немногочисленные успешные прогнозы объясняются «…удачным совпадением с реальностью», а в качестве обоснования такого тезиса отмечается, что «… можно предвидеть детерминированно-хаотический характер нелинейного процесса в целом, отдельных его стадий, сценариев перехода от одной стадии к другой. Но требуемая надежность и точность краткосрочных прогнозов конкретных событий остаются недостижимыми».

Приведем еще одно, совсем недавнее, утверждение аналогичного рода: «…доказано, что сейсмотектонические системы принадлежат к классу систем с самоорганизованной критичностью, в которых реализуется детерминировано-хаотическое поведение с непредсказуемостью конкретной динамики и катастроф (землетрясений, оползней)» [Захаров, 2014].

Разумеется, такой вывод по существу бросает тень на существующую методологию и алгоритмы прогноза сейсмичности. Он соответствует идеям конца прошлого века, в соответствии с которыми системы, обладающие масштабной инвариантностью, было принято считать непредсказуемыми. Но так ли это в действительности?

Во всяком случае, очевидно пришло время подумать, почему мы так думаем (или считаем) и что по этому поводу свидетельствуют новейшие экспериментальные и теоретические исследования сейсмического процесса. К ним могут быть отнесены результаты по анализу стационарных режимов активных систем, у которых диссипация компенсируется притоком энергии, новые идеи и подходы, основанные на изучении нестационарных процессов и метастабильных состояний, синхронизации автоколебательных процессов, в том числе синхронизации хаотических автоколебаний, структурной устойчивости переходных режимов, синергетики геосистем [Лоскутов, 2007, 2010; Спивак, 2008; Анищенко и др., 2010; Летников, 2011; Руманов, 2013; Шуман, 2014в,г].

Несомненный интерес представляют экспериментально установленные факты о специфической модификации спектра флуктуаций на заключительной стадии подготовки сейсмического события, наличия отчетливых периодов активизации и затишья [Гульельми и др., 2014].

Таким образом, круг вопросов, требующих дальнейших исследований в этой области, весьма широк. Однако, не отрицая важности аналитических и численных результатов, опыта и интуиции сейсмологов, решение проблемы прогноза связано, скорее всего, с результатами проектов, а не проблем, которые обычно пытаются решать в рамках старых, а не новых идей.

В настоящей публикации мы коснемся отдельных аспектов этой весьма сложной проблемы, обсуждение которых начато в предыдущих работах автора, не нашедших пока должного отражения в геофизической литературе.

Геосистемы и процессы в них. Принято считать, что литосферу в целом, как и ее части, целесообразно рассматривать как системы. Напомним, что геосистемы — это совокупность составных частей литосферы, объединенных потоком энергии и вещества. Они являются динамическими системами. В них всегда идут необратимые диссипативные процессы, в которых растет энтропия. Важная функция геосистемы — внутреннее перераспределение и рассеивание энергетических и информационных ресурсов, поступающих из низов литосферы и окружающей среды, а пространственно-временная «конкуренция» за эти ресурсы ее подсистем — это и есть тот динамический механизм, который и обеспечивает ее нестационарное поведение. При этом геосистема упорядочивает себя в зависимости от скорости поступающих в нее энергии и вещества. В свою очередь она состоит из подсистем, каждая из которых представляет сложноорганизованную структуру с различной нелинейностью, которая, вообще говоря, в значительной степени и определяет в них пространственно-временную изменчивость, явления и процессы. Эти подсистемы функционируют скоординированно на некоторых интервалах времени, распадаясь затем и формируя новые образования за счет возникающих и исчезающих функциональных связей, обусловленных вариациями поступающих энергетических ресурсов. Протекающие при этом процессы также имеют кооперативный (коллективный) характер. Сейсмический процесс — тоже результат эволюции такой многомасштабной иерархически организованной нелинейной динамической системы.

Как известно [Кадомцев, 1994], при подпитке энергией извне диссипативная система может испытывать устойчивые (в фазовом пространстве) колебания или перейти в режим сложного стохастического движения (странного аттрактора). В таких системах в процессе развития их фазовый объем сокращается,

а все траектории в фазовом пространстве принадлежат к соответствующему аттрактору. При выведении системы с помощью внешнего воздействия из заданного аттрактора она эволюционирует к другому аттрактору, зона притяжения (бассейн) которого покрывает точку начального состояния системы.

Процесс упорядочения, который может развиваться в условиях открытой неравновесной структуры, — литосферы с включением флюидных систем. Разумеется, весьма проблематично дать общее определение, которое включало бы все эффекты взаимодействующих в этом процессе подсистем, так как каждая из них также представляет собой сложную динамическую систему со своими временными масштабами.

Перечислим некоторые процессы, которые являются типичными и могут быть реализованы в геосистемах: синхронизация под действием внешнего периодического или случайного воздействия, авторезонанс как резонанс под действием силы, порождаемой самой системой, динамический и стохастический резонанс, шумоиндуцированные переходы, перемежаемость как непрерывный переход от регулярного движения к хаотическому.

К важнейшим типам колебательных процессов в геосистемах относятся так называемые автоколебательные процессы или автоколебания. Важное свойство автоколебательных систем — независимо от начальных условий «самонастраиваться» на режим функционирования, определяемый исключительно внутренними параметрами диссипативной системы [Анищенко и др., 2010]. Выделяют класс нелинейных диссипативных систем, не являющихся автоколебательными — стохастические автоколебательные системы, в которых шум приводит к возникновению колебаний, обладающих чертами автоколебательного режима.

Для автоколебательных систем характерны такие явления, как синхронизация и конкуренция мод — подавление одних колебательных мод другими. Эти эффекты оказываются принципиально важными и для появления высокоорганизованных структур в неравновесных диссипативных средах. В таких сре-

дах, помимо автоколебаний, возможно формирование автоструктур, не связанных с граничными условиями пространственно-временных образований, параметры которых всецело определяются лишь свойствами такой среды.

Автоколебательные системы разделяются на два типа: осциляторные и релаксационные. При этом релаксационные автоколебания с частичным сбросом энергии в виде сейсмоакустической и электромагнитной эмиссии изменяют фон естественных импульсных электромагнитных и сейсмоакустических полей Земли.

Известны различные источники автогенерации волн в активных средах. В частности, в неоднородных системах источником бегущих волн могут быть области, в которых собственная частота колебаний выше, нежели в окружающем их пространстве. Причем в случае нескольких таких источников среда синхронизируется самым высокочастотным из них [Васильев и др., 1979]. Примечательно, что неоднородные активные среды вследствие порогового эффекта могут гасить автоволновые процессы. Автоволны взаимодействуют между собой и координируются, в итоге формируется и сохраняется наиболее устойчивая и геометрически простая конфигурация со стоячими волнами. Напомним, что синхронизация, которую можно рассматривать в качестве метода самоорганизации взаимодействующих систем, возникает лишь в автоколебательных системах. Важно, что активные среды в ходе автоволновой синхронизации могут сопрягать процессы, соизмеримые в пространстве и времени.

В настоящее время известно несколько типов автоволновых процессов: бегущие импульсы, стоячие волны, синхронные колебания во всем пространстве, диссипативные структуры и др. [Васильев и др., 1979]. Термин «диссипативная структура» подчеркивает термодинамический аспект проблемы: они рождаются и существуют в термодинамически активных системах (геосреде) за счет диссипативных процессов утилизации энергии.

Геодинамические системы и хаос. Анализ нелинейных хаотических динамических систем — актуальная задача современ-

ного этапа исследований, а фракталы и хаос — подходящее средство исследования геосистем. Установлено, что хаос в нелинейных динамических системах может возникать универсальными способами независимо от природы системы. При этом случайность может быть обусловлена как ее внутренними свойствами, так и внешними факторами [Лоскутов, 2010].

Как известно, долгое время представление о хаосе ассоциировалось с тем, что в системе необходимо, по крайней мере, возбуждение большого числа степеней свободы. Но, как оказалось, существо дела даже здесь не в сложности системы и не во внешних шумах, а в появлении при некотором значении параметров системы экспоненциальной неустойчивости движения. Динамика систем, обусловленная такой неустойчивостью, получила название детерминированного (или динамического) хаоса.

Неожиданным явилось установление факта, что именно хаос определяет основные черты поведения системы, а не шумы внешнего происхождения [Лоскутов, 2007]. В то же время проблема слабого хаоса все еще остается нерешенной [Дайсон, 2010]. Она состоит в том, что хаотические движения часто ограничены определенными рамками и не приводят к катастрофической неустойчивости. Слабость хаоса — ключевое условие существования литосферы. Слабый хаос существенно отличается от полностью хаотического поведения. Он проявляется в том, что хотя близкорасположенные траектории и расходятся вначале экспоненциально, но их дальнейшее удаление ограничено и система как целое не разлетается на куски [Дайсон, 2010]. При этом в некотором диапазоне частот система может усиливать мощность шума, а колебания системы обладают свойством «синхронизуемости» как под действием внешнего воздействия, так и в результате взаимодействия [Анищенко и др., 2010].

Заметим, что по мере становления нелинейной динамики и с появлением теории динамического хаоса явление синхронизации было обобщено и на хаотические колебания в системах весьма различной природы. При этом под синхронизацией хаоса понимается явление возникновения периодического режима

под влиянием внешнего воздействия на хаотические автоколебания или в результате взаимодействия хаотических движений элементов системы (ее подсистем). Однако этот переход от хаотических колебаний к регулярным реализуется лишь при достаточной интенсивности взаимодействия подсистем (что указывает на существование порога) и связан, очевидно, с механизмом синхронизации через подавление хаотических автоколебаний. Следовательно, синхронизацию можно рассматривать как метод самоорганизации взаимодействующих подсистем. При этом реализуется эффект увеличения крупномасштабных флуктуаций при подавлении мелкомасштабных, причем независимо от начальных условий. С физической точки зрения этот эффект является следствием конкурентной динамики в развитии и организации подсистем, их способностью объединяться во взаимно синхронизованные ансамбли в соответствии с принципом максимальной диссипации энергии. Именно при таком объединении возникают структуры, которые получают преимущества в «конкуренции» за внутреннее перераспределение энергетических ресурсов.

Другая важная сторона рассматриваемых нелинейных систем — временное запаздывание в связях между их элементами (подсистемами), обусловленное конечной скоростью распространения сигналов и наличием в системах медленной динамики, т. е. динамически скоррелированных процессов, существенно более медленных, чем быстрый (со скоростью распространения возмущений) информационный обмен в динамической системе. При этом медленную динамику деформируемой нелинейной системы в деформируемых средах составляют процессы локализации деформаций и повреждений, формирование деформационных фронтов различных масштабов и различных волн повреждений. Как оказалось, роль медленных фронтов деформаций велика как в процессах формирования областей локализации неупругих деформаций в пластичных средах, так и очагов разрушения в хрупких [Макаров, 2012]. Исследования показали, что временное запаздывание в связях может приводить к существенному и неформальному усложне-

нию коллективной динамики системы, возникновению в ней новых динамических свойств, в частности существенному росту длительности переходных процессов, росту областей мультистабильности и появлению ее новых типов. В итоге мультистабильность можно считать одним их характерных свойств ансамблей подсистем (блоков) с запаздывающими связями [Клиньшов, Некоркин, 2013].

С этой точки зрения динамический анализ метастабильных состояний и переходных динамических процессов, связанных с взаимодействием различных подсистем, их конкуренцией (подавлением в автоколебательных системах одних мод другими) и синхронизацией во времени означает, очевидно, рождение нового направления в развитии теории геосистем и ее практических приложений. Весьма вероятно, что именно эти ключевые динамические объекты окажутся способными перевести моделирование поведения и развития геосистем на новый уровень понимания и реализации. Сфокусируем дальнейшее рассмотрение на некоторых аспектах, особенностях и возможностях такого описания, новых подходах к сбору экспериментальных данных и их обработке.

Синергетика геосистем и спонтанный шум литосферы. Как уже упоминалось, в соответствии с флуктуационно-диссипативной теоремой статистической физики, геометрический (спонтанный) шум литосферы — это универсальный эффект. Он обусловлен только наличием диффузии и может проявляться при генерации возмущений весьма различной природы. Эмиссионное сейсмоакустическое и электромагнитное излучения являются отражением собственной эволюции геосреды, а его спектр отражает стадию этой эволюции. Следует учитывать также возможность различного физического содержания процессов его генерации на различных уровнях геометрически самоподобной блоковой геосистемы, в частности генерации связанных акустоэлектромагнитных возмущений в диапазоне Гц—кГц [Дмитриевский, Володин, 2006; Шуман, 2012в].

Очевидно, что эмиссия должна рассматриваться в терминах динамических понятий устойчивости, аттракторов в фазовом

пространстве и их бифуркаций. Как известно, одна из моделей описания флуктуаций сейсмоакустической и электромагнитной эмиссии в процессе перестройки структуры пород связана с перколяционной моделью диффузионного фронта. Модель фронта градиентной скалярной перколяции (протекания) как неравновесного фазового в открытой системе в принципе позволяет дать физическую интерпретацию наблюдаемых параметров сейсмоакустических и электромагнитных шумов как неравновесного самоорганизованного критического явления [Зосимов, Лямшев, 1995]. С экспериментальной точки зрения именно фронты самоорганизованной критичности являются наиболее энергетически активным источником спонтанных излучений — и сейсмоакустических, и электромагнитных.

Таким образом, суть нового подхода к описанию эмиссий геосреды состоит в утверждении, что сейсмичность и спонтанная геоакустическая и электромагнитная эмиссии — это непрерывные во времени переходные динамические процессы, связанные с взаимодействием различных ее подсистем (блоков) и их синхронизацией во времени. В стабильном состоянии большинство этих подсистем демонстрируют сложную хаотическую динамику, которая отражает относительно слабое (фоновое) взаимодействие протекающих процессов, характеризующихся разными временными масштабами. Такое поведение и состояние обеспечивает геосреде возможность быстрого реагирования и адаптации на поступающую из низов литосферы дополнительную энергию, негэнтропию или изменения ее (геосреды) физических характеристик.

Имеются весомые основания считать, что геометрический шум литосферы может быть истолкован в терминах автоколебаний. Как известно, энергетическая и флюидная подпитка вызывает увеличение неравновесности и неустойчивости геосистемы. Рост неустойчивости ведет к формированию флуктуаций, которые при дальнейшем росте энергетической подпитки преобразуются в автосолитоны, тип которых определяется их характерными пространственно-временными масштабами. При этом структура колебаний определяется масштабами, ограни-

чивающими диапазон проявления фрактальных свойств. Существенно, что образование фрактальных агрегатов резко увеличивает мощность генерируемых средой эмиссий. Имеются экспериментальные подтверждения резких изменений фрактальной размерности генерируемых эмиссий при приближении к точке бифуркации системы (к сейсмическому событию) [Зосимов, Лямшев, 1995].

Очевидно, для описания многомасштабной структуры и свойств геосреды как диссипативной динамической системы требуются новые весьма специфические концепции и подходы. Один из них — многоуровневый подход к моделированию процессов деформации и разрушения твердых (и хрупких, и пластических) тел, согласно которому деформируемая среда представляет собой самоорганизующуюся нелинейную многоуровневую систему, в которой возникшая при нагружении деформация самосогласованно развивается как последовательная эволюция механизмов релаксации локальных напряжений и диссипации энергии [Псахье, 2013]. Важная особенность отклика такой деформируемой среды — образование диссипативных мезоструктур и фрагментация деформируемого материала. Возможные механизмы релаксации напряжений:

– в виде квазипластического деформирования среды;
– в виде локализованной катакластической деформации, мигрирующей по пространству;
– в виде лавинно-неустойчивого роста дефектов в локализованной пространственной области, уменьшающейся с течением времени;
– в очаге хрупкого разрушения [Макаров, 2012; Панин и др., 2012].

Установлены механизмы формирования локальных зон сильнонеравновесных состояний, в которых зарождаются дефекты различного масштабного уровня. При этом необходимость самосогласования сдвигов на различных структурно-масштабных уровнях обусловливает распространение в деформируемом твердом теле нелинейных волн канализированных локальных структурных превращений [Панин и др., 2012].

Новый аспект проблемы, не нашедший пока должного отражения в литературе — исследование совместного действия полей напряжений и диффузионного потока легких газов (водород, гелий и др.), пронизывающего литосферу. И. Гуфельд подчеркивает две основные особенности эффектов имплантации легких газов в различные геоматериалы: структурные перестройки и аморфизация структуры [Гуфельд и др., 2011]. Общим следствием их имплантации является формирование внутреннего состояния, проявляющегося в эффектах ползучести изменении объема. Важно, что прохождение восходящего потока легких газов непосредственно ведет к непрерывному изменению деформационных параметров горных пород на различных пространственно-временных масштабах [Гуфельд, 2007, 2013а].

Существенно, что эксперимент свидетельствует о синергетическом характере поведения этих факторов: отклик системы многократно возрастает.

Удается наблюдать деформации, на порядок больших тех, которые имеют место при воздействии каждого из этих факторов по отдельности [Спивак, 2008]. Возможно, это связано с возникновением особого состояния вещества, способствующего дополнительному снижению его устойчивости к действию сдвиговых деформаций. В итоге становится возможным возникновение (или инициирование) кратковременных высокоамплитудных (катастрофических) сдвиговых смещений.

Важным представляется и влияние на эти процессы шумов как внешнего, так и внутреннего происхождения. Следовательно, возникает важная с прикладной точки зрения задача исследования совместного действия напряжений и параметров диффузионного потока легких газов (водорода, гелия), изучение отклика такой системы на многочастотные и шумовые воздействия. В известной степени это дополняет и расширяет исходные принципы физической мезомеханики, акцентирующей внимание на описании твердого тела как иерархически организованной системы, волновом (автоволновом) характере распространения элементарного сдвига, разрушении как нелинейного

волнового процесса глобальной потери сдвиговой устойчивости нагружаемого тела [Панин и др., 2012]. Заметим, что в стабильном состоянии геосреда демонстрирует сложную хаотическую динамику. Такое состояние, как известно, обеспечивает геосреде возможность быстрого реагирования на вновь поступающую извне энергию, упорядочивая себя в зависимости от скорости поступления энергии и вещества.

Переходная динамика и критерии близости бифуркации стационарного режима. Согласно устоявшимся традициям, поиск и изучение предвестников землетрясений явно или неявно основаны на теоретических принципах и результатах теории катастроф. С математической точки зрения теория катастроф — это определение качественных изменений решений нелинейных дифференциальных уравнений, определяющих состояния, далекие от равновесия в зависимости от управляющих параметров: это совокупность, синтез приложений теории особенностей гладких отображений К. Уитни и теории бифуркаций А. Пуанкаре и А. Андронова.

Катастрофа происходит в виде резкого изменения состояния системы при плавном изменении управляющих параметров. Установлено, что с приближениям к катастрофе (бифуркации) происходит аномальный рост флуктуаций в системе, критическое замедление, понижение частот колебаний для некоторых мод («смягчение» мод вблизи «точки разрушения» [Гульельми и др., 2014]), рост времен релаксации и корреляционных длин, ряд других явлений. Наиболее исследованный предвестник сейсмического события — повышение сейсмической активности в разные интервалы времени, предшествующие сильным землетрясениям, сейсмическое затишье или сочетание активизации и затишья в разных пространственно-временных областях [Панин и др., 2012]. В то же время классический способ предсказания катастроф связан с восстановлением по экспериментальным данным (временным рядам) неизвестных уравнений. Однако такую процедуру реально провести лишь в случае небольшого числа степеней свободы (числа уравнений), что в случае распределенных систем крайне проблематично.

Кроме того, эффективность моделирования остается весьма ограниченной ввиду отсутствия необходимых данных и соответствующих технологий исследования геосреды с достаточным пространственным и временным разрешением. Имеющийся опыт динамического моделирования включает в себя набор элементарных моделей геосреды, развитой техники анализа, необходимой для понимания ее поведения хотя бы в целом. Ведущую роль в таком описании несомненно играет геометрическое представление эволюции геосистемы в малоразмерных проекциях ее фазового пространства.

При этом поведение системы может быть описано в терминах аттракторов, переходных состояний, устойчивости, бифуркаций хаоса и др. [Рабинович, Мюезинолу, 2010]. Ее динамика определяется временами пребывания в аттракторах и переходами между ними, а «плавные» деформации фазового пространства не приводят к качественным изменениям динамики системы. Однако в последнее время стали ясны и пределы применимости такого подхода. В частности, такое описание динамики сложных диссипативных систем, состоящих из многих взаимодействующих подсистем действительно, если плотности всех потоков, пронизывающих систему (энергии, материи и информации), достаточно сбалансированы и стационарны, а связи между подсистемами близки к симметричным [Рабинович, Мюезинолу, 2010]. Именно в этом случае фазовое пространство разбивается на области притяжения разных аттракторов — равновесию, периодическим колебаниям или странному аттрактору, одному из которых может соответствовать разрушение системы. В общем случае система может стремиться к одному из возможных аттракторов. При ее выведении из заданного аттрактора система будет эволюционировать к другому аттрактору, зона притяжения которого покрывает точку начального состояния системы. В таких сложных физических системах с многими аттракторами может развиваться процесс самоорганизации [Кадомцев, 1994].

Напомним, если мы имеем некоторую матрицу взаимодействия между подсистемами или элементами системы $\varphi_{ij}(E)$, где E

— энергия или энтропия, поступающая в систему, то при связях, близких к симметричным $\varphi_{ij}(E) \approx \varphi_{ji}(E)$, система демонстрирует мультистабильность или сосуществование в фазовом пространстве двух или более устойчивых состояний. При этом то состояние, к которому приходит система, определяется начальными условиями. Иначе говоря, в случае симметричных связей динамика системы представляет собой приближение к какому-либо устойчивому состоянию равновесия.

Что мы имеем в случае геосреды? Очевидно, поток энергии из мантии в литосферу, определяемый восходящим потоком легких газов водорода и гелия, непрерывен. Происходит процесс непрерывных преобразований структуры и свойств геосреды литосферы. И хотя процессы дегазации на современном этапе эволюции геосреды носят слабопеременный характер, на этом фоне проявляются импульсы дегазации на различных пространственных масштабах — от локального (в пределах отдельных блоков, их кластеров или отдельных граничных структур) до регионального. Постоянно изменяются физико-химические и физико-механические свойства элементов и параметров контактного взаимодействия (связей) в граничных структурах и внутри блоков за счет их взаимодействия с этими восходящими потоками легких газов и флюидов. Быстрая изменчивость параметров может коренным образом менять геотектонические условия — от фоновых до критических. Сейсмический процесс в итоге также в значительной степени контролируется интенсивностью этих восходящих потоков, их пространственной распределенностью в рассматриваемый период времени и степенью их разгрузки в приповерхностный ненагруженный слой земной коры. Следовательно, предположение о стационарности и сбалансированности открытых нелинейных геосистем, о симметрии связей между ее отдельными подсистемами (элементами) явно нереалистичны.

Напомним также, что геосреда может пониматься также как иерархия подсистем с различной нелинейностью. Но, как известно, сильная нелинейность может усилить диссипацию и разрушить фазовую структуру системы. Перечисленные фак-

торы резко осложняют или, возможно, закрывают возможности традиционных подходов к моделированию ее динамики, в частности сложных переходных состояний. Хотя в этом случае устойчивые состояния и существуют, но при этом область притяжения к тому или другому аттрактору может постоянно или даже весьма быстро изменяться. Понятно, что описание таких динамических систем требует новых идей и подходов. Разумеется, в общем случае для полного описания этих систем, к которым относится и геосреда (открытая неравновесная система), кроме баланса массы, импульса и энергии необходимо рассматривать и баланс энтропии, включающий качество приходящей к системе энергии и производство энтропии в физико-химических процессах, происходящих в системе [Изаков, 1997]. Но, к сожалению, такой подход весьма затруднен и очень сложно формализуется. В итоге получила широкое распространение теория состояний, далеких от равновесия, как синтез трех направлений исследований, а именно методов описания существенно неравновесных процессов, термодинамики открытых систем и теории катастроф. Это — синергетика или теория диссипативных структур.

Новая парадигма нелинейной динамики (теория самоорганизованной критичности — эволюции системы к критическому состоянию без настройки каких-либо параметров) привлекла к себе повышенное внимание и переоценку взглядов на динамику иерархических систем.

Предложены новые идеи и подходы, основанные на анализе нестационарных процессов и метастабильных состояний как ключевых динамических объектов.

Получили развитие работы по исследованию спектра шумов в сложных системах. Установлено, что нарастание низкочастотных мод в спектре шумов системы и рост обобщенной синхронизации являются надежными признаками приближения бифуркации стационарного режима — предвестниками катастроф.

Заключение. Можно предположить, что проблема прогноза сейсмической активности в настоящее время переживает пе-

риод, в котором сочетаются черты эволюции и кризиса. На данный момент не удается отобразить имеющуюся обширную эмпирику на одинаково разделяемой всеми аксиоматике. Однако тезис о принципиальной непредсказуемости сейсмических событий не имеет под собой достаточных оснований и не отвечает реальной ситуации. Стало очевидным, что такой прогноз невозможен без понимания основных механизмов, особенностей и закономерностей локализации деформационных процессов и формирования очагов разрушения в геосреде. Имеются весомые основания предполагать, что в основе большинства явлений в геосреде являются свойства открытых диссипативных систем. Как известно, их эволюция характеризуется самоорганизацией протекающих в них процессов и иерархией масштабов.

Новая парадигма заключается в том, что и сейсмичность, и спонтанная электромагнитная эмиссия литосферы — это результат устойчивой переходной активности геосреды, непрерывных во времени переходных динамических процессов, связанных с взаимодействием различных подсистем (блоков) геосреды, их «конкуренцией» за энергетические ресурсы и синхронизацией (координацией) во времени. При этом метастабильность и устойчивые переходы — одни из ключевых динамических объектов, которые способны перевести моделирование на новый уровень понимания и реализации. Важно, что и сейсмоакустическая, и электромагнитная спонтанная эмиссии обладают ярко выраженными свойствами нелинейных процессов, способностью к самоорганизации и хаотизации, характерному поведению при приближении к катастрофе и выхода из нее. С этой точки зрения на повестке дня — проект динамической сейсмологии и геоэлектрики.

Диссипативность динамики, компенсация энергетических потерь за счет внешних источников, активность отдельных подсистем или элементов геосреды (блоков разного ранга) является типичным для автоколебательных систем нелинейной динамики. Термины автоколебания, автоволны, автоволновые процессы подчеркивают тот факт, что их характеристики определяют-

ся параметрами геосреды и, что весьма важно, не зависят от начальных и граничных условий, т. е. задание текущего состояния системы. Кажется очевидным, что в условиях, когда невозможно точно оценить начальные условия, идея использовать с целью прогноза параметры и характеристики процесса, формирующиеся в условиях быстрого забывания (короткой памяти) о начальных данных как и положение о слабости хаоса в реальных геосистемах, — весьма перспективна. Важно, что и акустосейсмический, и электромагнитный (геометрический) спонтанный шум как универсальный эффект, который в соответствии с флуктуационно-диссипативной теоремой физики обусловлен только наличием диффузии и проявляющийся при генерации возмущений различной природы, может быть истолкован в терминах автоколебаний. Ввиду неизбежности генерации автоволн в активной геосреде представление об автоволновых механизмах самоорганизации получает в последнее время все более широкое распространение. Соответственно спонтанная эмиссия литосферы может быть истолкована в терминах динамических понятий устойчивых состояний, аттракторов в фазовом пространстве и их бифуркаций, а ее динамика определяется временем пребывания в этих состояниях (аттракторах) и переходами между ними. При этом сам переходный процесс — это движение, которому соответствует фазовая траектория в области притяжения аттрактора. В отсутствие внешнего шума фазовая траектория будет принадлежать тому или иному аттрактору в зависимости от начальных условий. Достаточно наличие шума любой интенсивности, чтобы в ансамбле подсистем геосреды наблюдался эффект стохастического резонанса. Исследование синхронной динамики автоколебательных систем различной природы и влияния шумов на синхронизацию — одна из актуальных задач современной нелинейной динамики, а одно из главных ее достижений XX в. — обнаружение универсальных сценариев перехода от упорядоченного движения к хаотическому при изменении параметров системы. В частности, нарастание низкочастотных мод в спектре шумов геосистемы и рост обобщенной синхронизации — надежные пред-

вестники приближающейся бифуркации стационарного (метастабильного) режима. Этот тандем в определенной степени решает проблему диагностики перехода от русла к джокеру, поставленную Г. Г. Курдюмовым и С. П. Малинецким.

Весьма вероятно, что в столь сложной ситуации динамический анализ метастабильных состояний и переходных процессов может означать появление нового направления в моделировании геосистем. При этом, очевидно, динамическая модель геосреды должна состоять из двух подсистем: одна нацелена на описание сейсмического (и электромагнитного) процесса в настоящем, а вторая дает возможные варианты будущего ее развития на основании анализа порождаемых системой временных рядов (наблюдаемых) в прошлом и использует нынешнее метастабильное состояние в качестве начальных условий.

Важный аспект проблемы — физика и природа быстрой изменчивости параметров геосреды и учет факторов, способствующих разрушению фазового пространства системы. Весьма вероятно, что ввиду исключительной сложности геосистем, для успешного их описания необходимо найти оптимальный уровень усреднения ее параметров и абстрагирования от деталей.

Фундаментальное свойство геосистем — наличие стадии подготовки сильных сейсмических событий: с приближением к событию происходит аномальный рост флуктуаций и так называемое критическое замедление, т.е. понижение частот колебаний некоторых мод (эффект резонанса на нулевой частоте), удлинение шкалы времен релаксации, эффекты синхронизации, увеличение крупномасштабных флуктуаций при подавлении мелкомасштабных, наличие локальных зон затишья и формирование диссипативных структур — цугов медленных деформационных фронтов. Эти признаки универсальны, могут быть обнаружены экспериментально, что вселяет определенный оптимизм. Примечательно, что имеющиеся успешные попытки прогноза вписываются в эту схему.

Таким образом, проблема прогноза сейсмичности, в том числе наиболее актуального — краткосрочного, отнюдь не безнадежна и не свидетельствует о патологической приверженно-

сти автора к этой идее. Но для ее решения необходим адекватный мониторинг состояния геосреды, в том числе активный, к которому геофизики пока не готовы, да, собственно говоря, и не ставили такой цели.

Можно предположить, что ближайшей задачей является организация мониторинга на иерархических уровнях организации геосистем, которые в зависимости от этого уровня могут проявлять свойства детерминированных, стохастических, хаотических и сложных систем, развитие и внедрение адекватных методов обработки больших массивов данных, дополнение пассивного мониторинга активным. Но трудности на этом пути значительны — они связаны как с недостаточной разработанностью самой нелинейной динамики, так и со сложностью и многообразием процессов, происходящих в геосистемах.

Нелинейная динамика, сейсмичность и аэрокосмические зондирующие системы

Геофизический журнал,
№ 2, Т. 37, 2015, С. 38—57.

Введение. В последние годы заметно углубился интерес геофизиков к проблеме описания геосреды как открытой неравновесной системы с множеством самоорганизующихся структур (подсистем). Согласно М. А. Садовскому, ей оказалась присуща внутренняя самоподобная структура, в которой нет места для какой-либо области с характерными размерами и границами, как не существует и какого-либо характерного масштаба. Основным процессом, протекающим в такой среде, оказался процесс самоорганизации. Показано, что она (геосреда) может рассматриваться не как пассивный континуум, а как активная (возбудимая) среда, в которой роль начального возбуждения играют энергетические потоки из низов литосферы, и может быть представлена в качестве ансамбля открытых нелинейных диссипативных систем.

Очевидно, в рамках таких представлений геосреда, стремящаяся к самоорганизации, нуждается в качественно новых моделях описания, которые бы позволили анализировать диссипацию поступающей

в нее энергии, релаксацию локальных напряжений, стационарные режимы деформирования и др. Нетрадиционность задач современной динамической теории неравновесных нелинейных сред связана, очевидно, с явлениями структурообразования и хаотической динамики ансамблей их структур (подсистем), «бифуркацией» их пространственных образов. Процессы в таких системах приводят к формированию устойчивых локализованных упорядоченных состояний, представляющих собой диссипативные структуры или автоструктуры, причем, как правило, при этом наблюдаются не уединенные автоструктуры, а ансамбли таких структур. Установлено, что возникновение диссипативных структур имеет пороговый характер, который неравновесная термодинамика связала с неустойчивостью системы: новая структура является результатом неустойчивости и возникает из флуктуаций.

Отличительные признаки нелинейных диссипативных систем — необратимые изменения во времени, пространственная и временная иерархическая делимость (фрактальность), недетерминированность поведения после прохождения критической точки (бифуркации), волновая и резонансная природа всех процессов, большая (а иногда и определяющая) роль малых возмущений. Имеются весомые основания полагать, что такая сложная система, как геосреда, упорядочивающая себя в зависимости от интенсивности и скорости поступающей в нее энергии, может быть представлена в виде автоколебательной системы.

Как известно, для автоколебательных систем характерны такие явления, как синхронизация, которую можно рассматривать как способ самоорганизации взаимодействующих подсистем, подстройку ритмов осциллирующих элементов за счет относительно слабого взаимодействия между ними, и конкуренция колебаний (подавление одних колебательных мод другими). Напомним в этой связи, что автоколебания отвечают условию, при котором отклик системы на внешнее воздействие оказывается непропорциональным воздействующему усилию, причем рассматриваемые сложноорганизованные системы оказываются избирательно чувствительными: они демонстрируют неожи-

данно сильные отклики на адекватные их внутренней структуре возмущения.

Акцент современной теории автоколебаний начал смещаться в сторону все более сложных, в том числе хаотических, колебаний, однако в ее основе по-прежнему находятся динамические принципы, заложенные А. А. Андроновым. Это — выделение и исследование структурно устойчивых систем и явлений, анализ структуры разбиения фазового пространства (пространства состояний) системы на траектории, включающий, в первую очередь, исследование аттракторов, исследование эволюции колебательно-волновых процессов при изменении параметров системы и выявление бифуркаций, определяющих перестройку этих процессов. В то же время нелинейно-динамический подход для геосистем наталкивается на значительные трудности, связанные с их необычностью и сложностью, отсутствием во многих случаях понимания архитектуры системы и особенностей межблочных взаимодействий.

Заметим, что все сложные диссипативные структуры являются нестабильно устойчивыми. Они могут формироваться на ранних этапах эволюции и развиваться в соответствии с автомодельными законами длительное время, сохраняя свою архитектуру, но распадаться при возмущениях, превышающих критические. Автомодельность — главная особенность эволюции таких сложных нелинейных систем в случае сильно коррелируемого поведения их подсистем.

Геосреда как нелинейная многомасштабная система, как уже отмечалось, обладает свойством саморганизованной критичности (СОК), относящейся также к базовым свойствам геосреды и выражающейся в степенной статистике ее системных параметров, а также наличием медленной динамики, миграции деформационной активности, перехода медленного квазистационарного режима деформирования в локальных областях в режим с обострением [Макаров, 2012; Пантелеев и др., 2013].

Пришло осознание того, что подход, основанный на идеях и принципах нелинейной динамики, является важным и эффективным направлением исследования геосистем.

Как известно, на уровне фундаментальных идей основы нелинейной динамики были заложены в работах И. Пригожина, С. П. Курдюмова, Г. Г. Малинецкого, П. Хакена и многих других исследователей. Часто ставится знак равенства между нелинейной динамикой как математической теорией эволюции динамических систем и синергетикой как теорией их самоорганизации. Один из ее ключевых элементов — понятие открытой системы, в которой идет постоянный обмен энергией, веществом и энтропией с внешней средой. При этом нелинейная динамика как междисциплинарная теория предложила методологию изучения систем весьма разнообразной природы. Ее основная задача — поиск законов, по которым функционируют отдельные части системы, ее подсистемы и как они взаимодействуют между собой, порождая коллективное поведение, отличное от поведения подсистем. Общие принципы, которые управляют динамикой таких крупномасштабных систем, в общих чертах могут быть сформулированы в следующем виде:

– качественная независимость поведения от умеренного шума;
– воспроизводимость поведения при близких условиях внешней среды и состояниях организации;
– конкурентность (подавление одних колебательных мод другими, за энергоресурсы);
– различный отклик на внешнее воздействие в зависимости от условий самовозбуждения в данный конкретный момент времени, в том числе и от уровня шумов в системе;
– среднеквадратичное среднее, которое не обеспечивает достаточную количественную оценку реакции системы на внешнее воздействие из-за структурированности системы.

Понятно, что ввиду исключительной сложности геосистемы для ее успешного описания необходим некий оптимальный уровень абстрагирования от деталей. Возможно, это может быть уровень переходных мод (динамических процессов) и метастабильных состояний [Рабинович, Мюезинолу, 2010].

В настоящее время получил развитие новый раздел нелинейной динамики — дробная динамика, в котором рассматри-

ваются общие свойства физических процессов со степенной памятью, степенной нелокальностью и фрактальностью [Tarasov, 2008].

Обратим внимание еще на одно важное обстоятельство: как известно, идея М. А. Садовского о модели литосферы в качестве системы взаимодействующих между собой отдельностей хотя, вообще говоря, и находится в русле концепции самоорганизации И. Пригожина, но в действительности выходит за ее рамки. В частности, это идея о роли разломов литосферы, которые, начиная с некоторого масштабного уровня, представляют собой не плоскости раздела, а зоны разной степени трещиноватости и раздробленности, в которых происходят активные диссипативные процессы.

Перечислим некоторые процессы, которые с точки зрения нелинейной динамики могут быть реализованы и являются типичными в геосистемах: синхронизация под действием внешнего непериодического или случайного воздействия, авторезонанс, динамический и стохастический резонанс, шумоиндуцированные переходы, перемежаемость как непрерывный переход от регулярного движения к хаотическому [Лоскутов, 2010].

В связи с развитием аэрокосмических средств наблюдения появились к настоящему времени уникальные возможности изучения геодинамического режима земной коры и протекающих в ней процессов, дающие новый взгляд на рассматриваемую проблему. Получили развитие методы спутникового мониторинга возможных предвестников сильных сейсмических событий [Липеровский, 2006; Черногор, 2011; Пулинец, Узунов, 2011; Пулинец и др., 2012]. Развиты представления о том, что физическая система Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера — это сложная открытая нелинейная динамическая система, ни одна из перечисленных подсистем которой, как оказалось, не является полностью самодостаточной, так как ее текущее состояние однозначно не определяет ее эволюцию в будущем.

Основная цель данной публикации — попытаться разобраться в важном с точки зрения геофизических приложений

вопросе: что нового дают идеи и подходы нелинейной динамики при решении задач литосферно-ионосферных связей, понимания механизмов, их реализующих, новых возможностей спутниковых технологий при развертывании систем мониторинга сейсмичности, в частности возможностей ее краткосрочного прогноза.

Представляется весьма странным, но во многих, даже вышедших совсем недавно работах, посвященных этим вопросам, хотя и подчеркивалась или декларировалась ключевая роль нелинейной динамики в решении указанных проблем, ее аппарат, ключевые представления и результаты, как правило, использовались весьма фрагментарно. И хотя за последние годы здесь удалось узнать много нового, ссылки на современное состояние вопроса в доступной нам литературе весьма ограничены.

Актуальная задача — попытаться разобраться в том, почему ситуация именно такова. Почему зачастую весьма проблематично обнаружить здесь какое-либо подобие общей схемы или хотя бы наброска решения перечисленных вопросов и как приблизить сложившуюся ситуацию к экспериментальной.

На первый взгляд может показаться, что искомые ответы почти очевидны: некоторые понятия нелинейной динамики весьма формализованы и рафинированы, а ряд ее изящных конструкций в реальности не наблюдаем. Но это, очевидно, только часть проблемы. Другая часть, возможно, связана с фундаментальностью, неоднозначностью и масштабами проблемы, возможностью различного физического содержания процессов, протекающих на разных уровнях геометрически самоподобной структуры геосреды. В то же время можно надеяться, что поиски ответов могут дать новый взгляд на явления и процессы в ней.

Дистанционные зондирующие системы — о состоянии вопроса. В связи с интенсивным развитием новых технологий измерений различных физических процессов, в частности с развитием методов аэрокосмического мониторинга различных проявлений природных и техногенных катастроф, в последние годы значительно расширили свои рамки и сферы применения

дистанционные зондирующие системы (ДЗ) для решения широкого спектра прикладных задач геологии и геофизики: картирования литологического состава поверхностных комплексов земной коры, включая гидротермально-метасоматические изменения горных пород, обнаружения тектонических нарушений, выявления площадей, перспективных на поиски углеводородов, мониторинга опасных геологических процессов. В рамках этих исследований получены важные результаты по дистанционному зондированию атмосферы, суши и океана, контролю физико-химических явлений и процессов в атмосфере, ионосфере, магнитосфере, околоземном космическом пространстве, их возможному влиянию на геодинамические процессы [Горный, Тронин, 2012; Вторая…, 2014].

Выполнен комплекс геохимических и спектрометрических работ по изучению спектральных характеристик приповерхностных отложений в связи с концентрациями в них таких элементов, как свинец, цинк, мышьяк. Развита комплексная технология прогнозирования месторождений меди, никеля, золота, олова, полиметаллов и др., включающая визуальное и формализованное дешифрирование космических съемок различного масштаба и специализированную обработку данных. Ведется активная разработка формализованных методов обнаружения территорий, перспективных на поиски углеводородов. Отмечается широкое использование спутниковой радиолокационной интерферометрии для изучения деформаций земной поверхности, основанной на измерении амплитуды и фазы отраженного от этой поверхности радиолокационного сигнала. Продемонстрированы возможности новой технологии изучения деформаций земной поверхности на основе спутникового позиционирования GPS/Глонасс, дополняющей и контролирующей данные спутниковой интерферометрии с использованием наземных приемников GPS. Создаются соответствующие сети наблюдений. В частности, в Японии такая национальная сеть насчитывает более 1200 станций, расположенных на удалении 20—50 км и проводящих мониторинговые изменения каждые 30 с.

Получила развитие методология, основанная на применении методов эталонной классификации многомерного признакового пространства по материалам дистанционных геофизических съемок. Большое количество работ опубликовано по результатам изучения тепловых процессов в системе литосфера—атмосфера—ионосфера. Имеют обширную историю и библиографию ионосферные исследования сейсмической активности.

В этой связи нашли широкое применение космические средства, позволяющие отслеживать деформации земной поверхности. В частности, в работах по изучению и прогнозу сейсмической активности NASA (США) акцентируется внимание на использовании высокоточной системы глобального позиционирования GPS, спутниковых радаров с синтезированной аппертурой In SAR. Как оказалось, использование этих технологий обеспечивает высокоточный мониторинг движений элементов земной поверхности — вплоть до нескольких миллиметров [Бучаченко и др., 1996; Липеровский, 2006; Пулинец, Узунов, 2011; Хаякава, Коровкин, 2011; Пулинец и др., 2012].

Считается весьма перспективным (даже безальтернативным) направлением по краткосрочному прогнозу сейсмичности наблюдения за ионосферой [Пулинец, Узунов, 2011].

Важная особенность дистанционных систем — возможность наблюдения Земли как целостной взаимодействующей с Космосом системы, изучение ее структуры и протекающих в ней процессов. При этом космический мониторинг позволяет получать однородную и сопоставимую по качеству геолого-геофизическую информацию для весьма обширных регионов, что трудно достижимо при наземных исследованиях.

В рамках синергетического подхода к сложным открытым системам сравнительно недавно предложена концепция обнаружения комплекса аномальных вариаций окружающей среды в области готовящегося землетрясения и, соответственно, физическая модель, называемая LAIC (Lithosphere — Atmosphere Ionosphere Coupling), в которой предпринята попытка связать в единую цепь физических процессов различные геофизические и геохимические параметры, в частности тепловые и атмо-

сферные аномалии с сейсмоионосферными аномалиями [Пулинец и др., 2011, 2012].

Говоря об основных и регулярно обнаруживаемых предвестниках сейсмических событий, прежде всего, имеются в виду вариации радона, тепловые аномалии в виде уходящего потока длинноволнового инфракрасного излучения, температура и относительная влажность приземного воздуха, аномальная облачность, аномалии электронной концентрации ионосферы и др. В рассматриваемой схеме комплексных взаимодействий LAIC радон, мигрирующий из земной коры в атмосферу, играет ключевую роль: именно он запускает рассматриваемую цепочку процессов в атмосфере, ответственных за появление различных типов краткосрочных предвестников [Пулинец, Узунов, 2011; Пулинец и др., 2012].

Тем не менее природа вариаций и миграции радона до конца не ясна. Как известно, при измерении объемной активности радона и плотности потока радона (активности радона, выходящего из единицы площади поверхности в единицу времени), существует ряд проблем, затрудняющих использовать его аномалию (а значит, и запускаемую им цепочку явлений в атмосфере—ионосфере) в качестве надежного предвестника сейсмического явления. В частности, вариации радона подвержены модулирующему влиянию как внутренних (геодинамических), так и внешних факторов. Особенности и типы геоструктур ведут к разнообразию динамики приповерхностной концентрации радона. Кроме того, приливные деформации и смена погодных условий в существенной степени определяют режим миграции радона из земных недр. При этом выброс радона может происходить не только до, но и во время и после землетрясения. Примечательно, что статистика данных, полученных по 300 землетрясениям, свидетельствует о том, что только примерно в 75 % случаев землетрясениям предшествовало заметное повышение концентрации радона [Липеровский, 2006].

Заметим в этой связи, что всплеск интереса к этим вопросам очевидно является своеобразным отражением «радонового бума» начала 90-х годов прошлого века, инициированного на

Западе, так и не давшим, однако, конкретных результатов относительно краткосрочного прогноза. В то же время, по мнению И. Гуфельда [Гуфельд, 2013а], спутниковый мониторинг земной поверхности и приповерхностной атмосферы позволяет, в принципе, обнаруживать эффекты разгрузки литосферы природными газами. Однако следует учитывать тот факт, что поверхностный слой земной коры связан с глубинными процессами только через разгрузку природных газов, а не с процессом формирования крупномасштабных структур разрушения. Очевидно, здесь все еще необходим некоторый период изучения, чтобы отобрать реально эффективную совокупность наблюдаемых предвестников, прежде чем начать практический прогноз (Концепция развития российской космической системы ДЗЗ на период до 2025 года. www.gisa.ru/file 766.doc.). При этом тепловая космическая съемка, несомненно, должна быть неотъемлемой частью системы глобального контроля за сейсмичностью.

Тем не менее тезис о безальтернативности спутниковых технологий, ставший в последнее время центром дискуссий среди многих сейсмологов, основанный на новейших и весьма продвинутых технологиях дистанционной регистрации процессов в системе литосфера—атмосфера—ионосфера, учитывая опыт предшествующих мониторинговых наблюдений, не представляется бесспорным. Как известно, скепсис в отношении прогноза сейсмичности, особенно в отношении краткосрочного, оказывался особенно силен там, где были созданы технически наиболее продвинутые и совершенные мониторинговые сети и, казалось бы, перспектива его надежной реализации была так близка.

Самоорганизованная критичность и прогнозируемость процессов. Как известно, парадигма СОК — эволюции системы к критическому состоянию без настройки каких-либо параметров — возникшая первоначально в связи с необходимостью понять наиболее общие закономерности в поведении сложных нелинейных динамических систем, обнаруживающих самосогласованное стремление к критическим режимам, сразу же привлекла к себе повышенное внимание геофизиков после

разработки П. Баком, С. Тангом и К. Визенфельдом первой модели, демонстрирующей это свойство [Bak et al., 1987; Шаповал, 2011]. Основная задача авторов СОК — объяснить причины возникновения флуктуаций в сложных неравновесных средах со спектром типа $1/f^{\beta}$, состоящих из многочисленных взаимодействующих подсистем, тоже нелинейных. Феномену СОК, объясняющей стремление таких сложных систем к режиму с обострением в области низких частот, посвящена обширная литература (см., например, [Милованов, 2004] и цитируемые там источники). В последние годы установлено соответствие СОК фундаментальным физическим принципам, лежащим в основе современной теории динамических систем. Как оказалось, для достижения самоорганизованной критичности необходимо, чтобы все внешние воздействия на динамическую систему были как можно более медленными: в этом случае стремление системы к СОК становится универсальным явлением, не зависящим от специфики системы. В этом случае свойство СОК вытекает из минимальности действия в пространстве неравновесных стационарных состояний [Зеленый, Милованов, 2004].

Иначе говоря, универсальность СОК как явления связано с предположением о медленности изменений внешних вынуждающих воздействий — потоков, пронизывающих систему. Разумеется, в ряде случаев предположение о медленности изменений внешних воздействий, как и симметрии связей между подсистемами геосреды, могут быть не только нереалистичными, но и существенно менять существо дела на пути моделирования и прогноза динамики сложных переходных состояний в системе. В итоге задача прогнозируемости систем с СОК оказывается весьма сложной.

Естественно, прогнозные свойства модели БТВ и ее модификации оказались в центре дискуссий о прогнозируемости сейсмических событий. В частности, на основе тезиса о том, что системы, обладающие масштабной инвариантностью $F(s) \sim s^{-b}$, было принято считать непредсказуемыми. В дебатах на страницах журнала «Nafure» за 1999 г. обсуждался вопрос, действительно ли существует принципиальная возможность прогноза

сейсмичности. Предпринимались попытки подтверждения гипотезы о непрогнозируемости систем с СОК в различных моделях сейсмичности. Некоторые исследователи продолжают утверждать о невозможности прогноза, если опираться на закон Гутенберга — Рихтера.

Таким образом, «… следует либо считать недостаточно обоснованным результаты прогноза землетрясений, либо поставить под сомнение самоорганизацию сейсмических процессов, либо уточнить гипотезу о непредсказуемости типичных систем с СОК» [Шаповал, 2011]. А. Б. Шаповал утверждает, что эмпирический анализ свидетельствует о существовании эффективного прогноза в системах с СОК, а представление о самоорганизации сейсмического процесса согласуется с предсказуемостью наиболее сильных событий. В то же время следует заметить, что эффективность прогноза весьма зависит от локальной нестационарности процесса и является неоднородной во времени, причем стационарность такой модельной системы имеет место лишь на чрезвычайно длинных временных интервалах. Это вполне согласуется с приведенными выше соображениями о требовании медленности изменений внешних воздействий на систему. В итоге, хотя теория СОК и адекватно во многих случаях отвечает задачам истолкования экспериментальных данных по изучению флуктуаций со спектром $1/f$ (появление характерного розового шума на низких частотах), вопросы понимания общих закономерностей пространственно-временного поведения нелинейных полей и возмущений в диссипативных неравновесных средах, их важных деталей, остаются весьма актуальными.

Очевидно, исследования этих и близких к ним явлений требуют разработки новых моделей, методов и, что не менее актуально, адекватных образов и понятий, общих для неравновесных сред произвольного типа. Весьма вероятно, что в этом контексте особый интерес вызывает новый раздел современной физической теории — дробная динамика, в которой рассматриваются самые общие свойства физических процессов со степенной памятью, степенной нелокальностью и фрактально-

стью. Очевидно, дробная или странная динамика — новый аналитический аппарат, адекватный сложным нелинейным системам с многомасштабными корреляциями в пространстве и времени [Зеленый, Милованов, 2004; Тарасов, 2009; Рабинович, Мюэзинолу, 2010]. Весьма важно, что этот математический формализм, лежащий в основе дробной динамики, в некотором смысле оказывается эквивалентным методу обобщенного характеристического уравнения. Такой подход не нарушает аналитическую структуру важнейших уравнений математической физики [Зеленый, Милованов, 2004].

В принципе возможен синтез дробной динамики с фрактальной топологией, связующим звеном между которыми являются представления о неравновесном квазистационарном состоянии системы, устойчивость которого (как динамическая, так и структурная) достигается за счет многомасштабных корреляций в пространстве и времени. С этой точки зрения сейсмичность может быть истолкована и трактоваться в качестве результата устойчивой переходной активности геосреды как активной неравновесной системы с конечной во времени плотностью энергетических ресурсов.

Как уже отмечалось, имеются весомые основания думать, что ее описание окажется эффективным на уровне переходных мод и метастабильных состояний (процессов), связанных с взаимодействием различных подсистем геосреды и их ансамблей, их синхронизацией и подавлением одних колебательных мод другими, исследования синхронной динамики и влияния шумов на синхронизацию, особенностей превращения одних структур в другие при изменении параметров геосистемы. Ввиду обширности, важности и специфичности темы, а также в контексте полученных в этой области теоретических результатов, попытаемся рассмотреть проблему прогнозируемости сейсмического процесса более подробно, включая и ее краткий исторический аспект. Продолжим исследование этих проблемных вопросов, начатые автором в предыдущих публикациях [Шуман, 2014б—г].

Как известно, особый размах исследования в области прогноза сейсмической активности получали, начиная с 50—60-х годов прошлого века. Всплески оптимизма и близости цели, ирония и скепсис, иллюзии и безысходность, подъемы и спады — характерные черты этих исследований и состояния вопроса. Библиография по прогнозу сейсмичности весьма обширна. В рассматриваемом контексте достаточно сослаться на недавно вышедшие публикации, посвященные этому вопросу, и приведенные там ссылки [Соболев, Пономарев, 2003; Кособоков, 2005; Шебалин, Воробьева, 2006; Гуфельд, 2007, 2013а; Родкин и др., 2009; Гуфельд и др., 2011; Шаповал, 2011; Пантелеев и др., 2013 и др.]. При этом данные публикации следует рассматривать в совокупности, так как приведенные в них ссылки часто канализируемы, ограничены, специфичны, отражающие вкусы и предубеждения авторов.

Очевидно, доминанта проблемы прогноза сейсмичности — отсутствие должного понимания физики процесса, являющегося основным препятствием ее успешного решения. И хотя за последние десятилетия удалось значительно продвинуться на этом пути, текущее развитие событий лишь подтверждает эту точку зрения, высказанную еще в 80-х годах прошлого века известным сейсмологом Н. В. Шабалиным. Возможно, как реакция на безуспешность попыток прогноза в 90-х годах получила широкое распространение и многочисленных сторонников концепция о принципиальной непредсказуемости землетрясений, особенно в краткосрочной перспективе. И такой подход, как это ни парадоксально, получил наибольшую поддержку как раз там, для тех территорий, где, как уже упоминалось, были созданы наиболее плотные и обширные мониторинговые сети [Родкин и др., 2009]. Тем не менее тезис принципиальной непредсказуемости сейсмичности не получил достаточного обоснования и, вообще говоря, не отвечает реальной ситуации. В частности, примерно в то же время была продемонстрирована статистическая значимость результатов применения некоторых алгоритмов среднесрочного прогноза, достаточно эффективно предсказывающих сильные сейсмические события в реальном

времени [Шаповал, 2011]. Было установлено, что в рамках систем с СОК возможно построение модели сейсмического процесса, крупные события которой прогнозируемы с помощью адаптивных предвестников. Но, как следствие своей универсальности, эти алгоритмы прогноза, практически не использующие другие геофизические данные, кроме сейсмических, в частности информации о других геофизических полях, обладают определенной ограниченностью и, соответственно, являются недостаточными для реального прогноза, особенно краткосрочного. Попытка снятия этих ограничений предпринята Г. А. Соболевым, хотя в его подходе учет изменчивости геофизических полей все еще продолжает играть второстепенную роль. При этом его алгоритмы прогноза также основаны на концепции СОК, но дополнены представлениями модели разрушения С. Н. Журкова (его концентрационном критерии [Журков и др., 1977], справедливость которого, по мнению ряда исследователей, как будто подтверждается на большом объеме экспериментальных данных [Уломов, 2007]). Тем не менее в последние годы стала очевидной ограниченность общепризнанной модели разрушения, согласно которой землетрясения должны быть локализованы в областях высоких тектонических напряжений. Как оказалось, областям формирования особо сильных землетрясений соответствуют участки их относительно небольших или умеренных значений [Родкин и др., 2009; Гуфельд, 2007, 2013а].

Стало понятно, что любой прогноз разрушения, в принципе, невозможен без учета многомасштабной иерархической природы процесса разрушения, особенностей развития его медленной квазистационарной и сверхбыстрой стадии и условий перехода стадии устойчивого развития разрушения в неустойчивый сверхбыстрый режим [Макаров, 2012]. Традиционная механика не смогла предложить удовлетворительных математических моделей описания упомянутых стадий и самого процесса разрушения как многомасштабного явления, а традиционный критериальный подход, основанный на макроскопическом масштабе усредненного описания, в принципе не может решать проблему прогноза разрушения.

Однако совсем недавно предпринята попытка ревизии, казалось бы, бесспорного факта о невозможности прогноза сейсмичности без понимания основных механизмов, особенностей и закономерностей локализации деформационных процессов и формирования очагов разрушения в геосреде.

По мнению А. А. Наймарка и В. С. Захарова [Наймарк, Захаров, 2012] «дело не в том, что механизм подготовки сейсмического события изучен недостаточно: но сам механизм таков, что порождает непредсказуемую хаотическую динамику (с. 188)». Становятся невозможными ни надежное прогнозирование будущего, ни реконструкция прошлого. По существу, это возврат к тезису принципиальной непредсказуемости землетрясений, популярному в конце 90-х годов прошлого века, о котором уже упоминалось выше, но уже с попыткой его обоснования на базе нелинейной динамики. Этот тезис обосновывается тем обстоятельством, что «при достаточной удаленности от равновесия нелинейность порождает непрогнозируемую динамику». Это весьма любопытная, хотя, очевидно, и весьма частная трактовка проблемы. Действительно, как известно, сильная нелинейность разрушает фазовое пространство системы. В то же время нелинейность может существенно усилить поглощение. Стало понятным, что вообще наш мир устойчив за счет нелинейности.

С физической точки зрения важное значение имеет также установление и осознание следующих факторов: переход диссипативных нелинейных систем в режим стохастического поведения при изменении их параметров осуществляется лишь несколькими различными способами, причем эти пути перехода зачастую оказываются общими не только для систем различной физической природы, но вблизи границы перехода и для сосредоточенных и распространенных систем [Рабинович, 1983].

Несомненно, предикторы землетрясений, обладающие определенной надежностью, могут быть получены только из теоретических представлений о физике процесса.

Примечательно, что история вопроса о возможностях прогноза сейсмичности по имеющимся данным о процессах, про-

исходящих в системе литосфера—ионосфера, и в связи с наступлением эры спутниковых технологий в общем демонстрирует весьма сходную картину, а именно от констатации о невозможности создания спутниковых или ионосферных систем прогноза при жестких требованиях к уровню пропуска цели [Пилипенко, 2006; Гуфельд, 2007, 2013а] до утверждений об универсальности и даже безальтернативности построения любых систем мониторинга и прогноза сейсмичности без использования спутниковых технологий [Пулинец, Узунов, 2011; Пулинец и др., 2012]. И далее, «…несмотря на известный пессимизм и даже отрицание принципиальной возможности краткосрочного прогноза … сегодня можно утверждать, что эта важная проблема геофизики фактически решена» [Дода и др., 2013]. И это на основании некоторой эмпирической схемы прогноза, фактически не опирающейся на какие-либо конкретные свойства литосферы и процессов в ней. И хотя авторы и отмечают, что эта эмпирическая схема может давать сбои в ряде случаев, а теоретическое обоснование отдельных ее граней и физических механизмов взаимосвязи различных признаков приближающегося сейсмического события на количественном уровне пока отсутствует, это не меняет существа дела — проблема решена. Однако даже при беглом рассмотрении этой схемы становится ясным, что те возмущения, которые трактуются как предвестники, отражают лишь региональные возбуждения системы литосферных блоков за счет активации процессов дегазации. Можно только надеяться, что подобный мониторинг позволит лишь приблизиться к прогнозу события и локализации зоны крупномасштабного разрыва, которая пока остается весьма неопределенной. Поиск же каких-либо косвенных признаков прогноза сейсмичности в раздробленном и ненагруженном поверхностном слое, связанным с глубинными процессами только через разгрузку природных газов и в большой степени поверхностном воздействии внешних воздействий (метеофакторов, приливных явлений, сейсмических волн удаленной сейсмичности и др.), по мнению И. Л. Гуфельда, не мог дать положительных результатов [Гуфельд, 2013а]. В то же время обнаружение

положительных тепловых аномалий, ассоциируемых с активными разломами в земной коре, весьма примечательно.

Ввиду особой дискуссионности вопроса, остановимся на некоторых его аспектах более подробно.

Литосферно-атмосферно-ионосферные связи и прогноз сейсмичности. В настоящее время, как уже упоминалось, большое внимание уделяется наземным и космическим системам исследования свойств литосферы, атмосферы, ионосферы и развивающихся в них динамических процессов. И если физико-химические процессы в каждой из этих подсистем этой сложной открытой, существенно нелинейной системы, получили, можно сказать, более-менее адекватную трактовку, эффекты и механизмы их взаимодействия менее изучены и известны [Черногор, 2011]. Взаимодействия между подсистемами весьма разнообразны и осуществляются с помощью квазистатических (гравитационного, электрического, магнитного) переменных электромагнитных полей различной природы, акусто-гидродинамических волн, потоков плазмы, излучений и др. В них имеют место необратимые диссипативные процессы, при этом особый интерес представляют ситуации, когда в рассматриваемой подсистеме возникают различные нелинейные структуры за счет притока энергии, вещества из другой подсистемы [Липеровский, 2006; Черногор, 2011]. Подсистемы находятся в метастабильном состоянии, весьма чувствительны к внешним воздействиям относительно слабых возмущений и флуктуаций. В приповерхностном слое осуществляется активный контакт литосферы и атмосферы, наблюдаются интенсивные массо- и энергообменные процессы, происходит взаимодействие между физическими полями. Большой динамичностью и изменчивостью характеризуются электрические процессы. При этом сам приповерхностный слой оказывает значительное влияние на приземный слой атмосферы, являясь источником радиоактивных эманаций, водяного пара, аэрозолей, определяет его температурный режим и, соответственно, устойчивость и вертикальный перенос.

К настоящему времени выдвинуто несколько вероятных гипотез относительно механизма связи между литосферной активностью и ионосферой, в частности химический, акустический и гравитационно-волновой, электромагнитный [Липеровский, 2006; Хаякова, Коровкин, 2011]. В первом аномальные возмущения в атмосфере, ионосфере и магнитосфере вызваны, наряду с температурой земной поверхности, эманацией радиоактивных газов (в основном, радона) из земной коры. Они индуцируют возмущения в проводимости атмосферы, что обусловливает изменения ионосферы под влиянием атмосферного электрического поля, внося таким образом существенный вклад в баланс глобальной электрической цепи.

Разумеется, радон здесь играет решающую роль, запуская в атмосфере цепь процессов, причем в некоторой временной последовательности с определенным запаздыванием по мере увеличения высоты проявления регистрируемой аномалии [Пулинец, Узунов, 2011; Пулинец и др., 2012]. Иначе говоря, вариации радона здесь принципиально важны для реализации всей цепи генерации краткосрочных предвестников сейсмических событий. Это дает возможность ввести в рассмотрение и использовать некие обобщенные параметры (в частности, такие, как поправка к химическому потенциалу и вариации регионального содержания электронов относительно их глобального содержания), которые, в принципе, позволяют определить стадию подготовки события [Пулинец и др., 2012]. Именно такой подход считается перспективным по краткосрочному прогнозу по наблюдениям за ионосферой.

Второй механизм взаимосвязи между литосферной активностью и ионосферой основан на ключевой роли атмосферных колебаний в системе литосфера—атмосфера—ионосфера: возмущения давления и температуры на земной поверхности в регионе с сейсмической активностью возбуждают атмосферные колебания, переходящие и активизирующие ионосферу.

Третий механизм состоит в том, что радиоизлучения любого диапазона частот, генерируемые литосферой, распространяются в ионосферу и изменяют ее путем нагрева и ионизации. Од-

нако, согласно [Хаякава, Коровкин, 2011], этот механизм представляется маловероятным по причине слабой интенсивности литосферной электромагнитной эмиссии.

Но сейсмоионосферные проявления — только часть фундаментальных связей между литосферой, нижней атмосферой и ионосферой, а процессы ионизации и вся цепочка явлений, запускаемая инжекцией радона, связанных с конденсацией, выделением тепла и атмосферным электричеством, может быть обусловлена и другими явлениями, а не только землетрясениями.

К примеру, электрические поля того же масштаба в атмосфере могут генерироваться под воздействием мощных атмосферных фронтов, ионизацией верхних слоев атмосферы галактическими космическими лучами, развитием тропических ураганов и другими, хотя, разумеется, изменение динамики выхода литосферных газов (нестационарность дегазации) является, очевидно, доминирующим фактором. Здесь необходимо выходить из условия, что малое внешнее воздействие со стороны литосферы оказывает влияние на ионосферу — сложную открытую динамическую систему, находящуюся в граничнонестабильном состоянии. И вопрос в том, как это внешнее воздействие изменяет ее состояние и времена пребывания в них. Примечательно, что все эти явления представляются спорадическими и весьма зависимы от конкретных условий.

Особенность плазменного слоя в верхней атмосфере, находящегося в магнитном поле земного ядра (ионосферы), состоит в том, что в отличие от жидкостей или газов, в которых обычно существует только один тип возмущений (волн) — звуковые, в такой плазме может реализовываться целый спектр колебаний, например плазменные продольные колебания ее электронной компоненты, совместные продольные колебания электронов и ионов — ионно-звуковые, верхнегибридные плазменные электронные колебания, ориентирующиеся перпендикулярно магнитному полю и др.

Очевидно, в столь сложной ситуации, помимо проведения исследований конкретных событий, связанных с сейсмичностью, весьма востребованы также статистические исследования кор-

реляции между ионосферными возмущениями и сейсмическими событиями. В этом контексте рядом исследователей высказывается мнение, что предвестники в ионосфере можно идентифицировать лишь с некоторой вероятностью из-за большой изменчивости этой области околоземного пространства, так как имеется часть ионосферных аномалий, которые не сопровождаются сейсмическими событиями даже в спокойных геомагнитных условиях [Perrone et al., 2010].

Однако предложенные модели литосферно-ионосферных связей, согласно [Гуфельд, 2013а], не сопоставлялись с процессами подготовки сейсмических событий и не учитывали особенностей поведения поверхностного слоя земной коры, испытывающего воздействие в большей степени фоновых полей различной природы (метеофакторов, приливов, волн удаленной сейсмичности), и поиски каких-либо косвенных признаков прогноза сейсмичности в нем «…не могли дать положительных результатов». Поверхностный ненагруженный слой связан с глубинными процессами только через разгрузку природных газов, и спутниковый мониторинг земной поверхности и приповерхностной атмосферы, в принципе, позволяет обнаруживать эти эффекты.

Таким образом, модель литосферно-атмосферно-ионосферных связей относится фактически к процессам в верхнем полупространстве, запускаемым эсхалирующим из верхнего слоя земной коры радоном, и его вариации принципиально важны для всей цепи генерации возможных предвестников. Однако фактически методы спутникового мониторинга ИК-излучений и приповерхностной атмосферы и ионосферы также, как и методы мониторинга в приповерхностном слое по причине его раздробленности и ненагруженности, являются косвенными, отличаются слабой чувствительностью к глубинным процессам, определяющим сейсмический процесс, и могут носить лишь вспомогательный характер [Гуфельд, 2007, 2013а]. Многие из этих явлений носят несейсмическую природу и имеют весьма мало общего с сейсмологией, которая, вообще говоря, дает ключевую информацию о литосфере и процессах в ней. Иссле-

дования последних лет свидетельствуют о том, что проблема неоднозначности поведения радона перед сейсмическим событием не может рассматриваться в общем случае вне контекста построения геодинамической модели сейсмичности [Уткин, Юрков, 2010]. И хотя вариации радона, эсхалирующего из приповерхностного слоя земной коры, принципиально важны при обосновании комплексных связей в рамках системы литосфера—атмосфера—ионосфера и методов спутникового многопараметрического мониторинга сейсмоопасных территорий, включающего метод «химического потенциала», «ионосферного отклика», длинноволнового ИК-излучения, линейных облачных структур, способного, по мнению авторов [Пулинец и др., 2012], «…обеспечить решающий прорыв в реализации проблемы краткосрочного прогноза землетрясений», такой вывод представляется преждевременным. По меньшей мере, было бы ошибочным предполагать, что такой мониторинг открывает только радужные перспективы. Представляется более обоснованным рассматривать динамику эсхаляции радона в качестве показателя неустойчивости состояния геосреды, не являющегося предвестником в буквальном смысле, напрямую не связанным с процессами подготовки сейсмического события. Заметим также, что современной сейсмичности соответствует и геосреда, и геофизический процесс.

Геодинамика и спонтанная сейсмическая и электромагнитная активность. Как свидетельствует обширный натурный эксперимент, литосфера генерирует сейсмические колебания в чрезвычайно широком диапазоне частот — от сотен герц до 10^{-4} Гц. Установлено, что относительно низкочастотные возмущения являются собственными колебаниями Земли, частотный спектр которых насчитывает несколько тысяч собственных частот. На эти колебания накладываются сейсмические шумы весьма различной природы (и экзогенного, и эндогенного происхождения) также в широком спектре частот — от долей герца до килогерц [Геншафт, 2009; Чеботарева, 2011]. На границе раздела «земля—воздух», над нею, а также в скважинах наблюдается большое разнообразие электромагнитных возмущений весьма различ-

ной природы также в исключительно широком диапазоне частот — от 10^{-4} до 10^{6} Гц и выше [Левшенко, 1995; Сурков, 2000; Гульельми, 2007]. Стало очевидным, что в широком смысле вопрос о природе сейсмоэлектромагнитных эмиссий литосферного происхождения является фундаментальным и не существует универсальной модели, пригодной и действительной для всех типов эмиссий, генерируемых геосистемой. В частности, электромагнитные эмиссии могут генерироваться как в земной коре, так и на земной поверхности, в атмосфере, ионосфере, магнитосфере и космической плазме. Их природа совершенно различна, а объединение их по признаку «электромагнитное излучение» весьма условно.

В рассматриваемом нами контексте первостепенный интерес представляет спонтанная эмиссия литосферного происхождения.

Абстрагируясь от деталей, природа спонтанной эмиссии — трансформация собственной энергии геосреды в различные локальные неустойчивые состояния, которые и являются, в конечном счете, ее источниками. Новая парадигма ее описания состоит в том, что и сейсмичность, и спонтанная электромагнитная эмиссия литосферного происхождения — это продукт непрерывных во времени переходных динамических процессов, связанных с взаимодействием различных подсистем геосреды, их синхронизацией во времени и «конкуренцией» за энергетические ресурсы. Это результат устойчивой переходной активности геосреды, представляющей собой открытую неравновесную систему с конечной во времени плотностью энергетических ресурсов и потоков. В определенном смысле это — метастабильные состояния и устойчивые переходы (или последовательность таких состояний) как ключевые динамические эффекты.

Важно, что эмиссионное излучение, и сейсмоакустическое, и электромагнитное, являются отражением собственной эволюции геосреды, а его спектр отражает стадию этой эволюции. В целом геосистема оказывается способной формировать различные (в том числе, и хаотические) пространственные струк-

туры активности, представляющие собой импульсы и фронты возбуждений, неустойчивость которых ведет к формированию в ней самоподдерживающихся колебаний с определенной пространственной конфигурацией. С экспериментальной точки зрения именно эти фронты возбуждений и связанные с ними фронты самоорганизованной критичности и являются наиболее энергетически активными и значимыми источниками сейсмоакустического и электромагнитного спонтанного излучения, обладающего упорядоченной пространственно-временной структурой, тесно связанной со строением и динамикой геосреды. В итоге в ней формируется некоторое обобщенное энергетическое (или автоволновое) поле, самоорганизующееся за счет элементарных энергетических полей ее подсистем и элементов. С изменением потока энергии и веществ из низов литосферы в такой системе происходит качественная перестройка сформировавшихся ранее или возникающих в процессе эволюции диссипативных или автоволновых структур. Эти релаксационные (разрывные) автоколебания с частичным сбросом энергии в виде электромагнитной или сейсмоакустической энергии и являются одним из источников изменений (вариаций) естественного импульсного электромагнитного и сейсмоакустического полей, регистрируемых на земной поверхности.

Имеются также весомые основания полагать, что это эмиссионное излучение в свою очередь может быть истолковано в терминах автоколебаний, устойчивость которых (как структурная, так и динамическая) достигается путем многомасштабных корреляций в пространстве и времени. Весьма важно, что диссипативные процессы, как известно, ведут к относительно быстрому «забыванию» системой начальных условий и независимо от их особенностей формируют с течением времени одни и те же или схожие пространственно-временные структуры. В итоге в геосреде формируется собственное сейсмоакустическое и электромагнитное поле эмиссионной природы, эволюционирующее в пространстве и времени, также обладающее упорядоченной структурой. Ясно, что и механизмы распространения спонтанных эмиссий должны быть специфическими,

причем определяющая роль здесь должна принадлежать автоволновому распространению. При этом в качестве базового механизма процесса трансформации энергии механической в электромагнитную может быть принято переходное фрактальное рассеивание волны (возмущения) диэлектрической проницаемости на зарядах, сгустках зарядов и диполей, содержащихся в геосреде или возникающих в ней [Гинзбург, Цытович, 1984].

Напомним, что переходным рассеиванием называют процесс излучения в нестационарной среде. Согласно В. Л. Гинзбургу, излучение заряда может быть связано не только с его ускорением, но и с изменением диэлектрической проницаемости окружающей его среды. При этом любое переходное излучение можно рассматривать как следствие процесса трансформации волны (возмущения) проницаемости с образованием электромагнитных, а в принципе, и других типов волн [Гинзбург, Цытович, 1984].

Обратим внимание на некоторые нетипичные нелинейные явления в структурно-неоднородных средах. Во-первых, это наличие доминантных частот и, во-вторых, наличие механизмов, переносящих энергию колебаний в низкочастотную или высокочастотную области спектра. Причина такого явления — во внутренних резонансных свойствах и сильной нелинейности, ответственной за перекачку энергии в эти частоты. Это означает, что принимающий сигнал, прошедший через реальную структурно-неоднородную среду, несет информацию об источнике его генерации и трассе своего распространения. В этом контексте «томографию» спонтанной электромагнитной эмиссии можно рассматривать не только как метод локализации ее источников, но и в более расширенной постановке как общий подход к восстановлению архитектуры геосреды и прогнозу ее поведения путем анализа электромагнитных сигналов, порождаемых самой геосистемой [Шуман, 2012, 2014б]. Важно, что здесь мы имеем дело с новым классом процессов и явлений, которые сегодня востребованы и используются при создании но-

вых технологий и методов зондирующих и мониторинговых систем [Чеботарева, 2011; Шуман и др., 2012].

Геосистемы и мониторинг. Очевидно, для описания многомасштабной структуры и свойств геосреды как диссипативной динамической системы, переходной динамики и поиска критериев близости бифуркаций ее стационарных режимов требуются новые, весьма специфические концепции и методы. Что же нового вносят идеи и подходы нелинейной динамики в решение прикладных задач геомеханики, в частности мониторинга состояния геосреды и проблемы прогноза сейсмичности? Прежде всего, это обоснование в ее рамках наличия широкого спектра процессов и явлений, которые могут быть реализованы и являются типичными для геосистем. В частности, это синхронизация под действием внешнего периодического или случайного воздействия, динамический и стохастический резонанс, авторезонанс, шумоиндуцированные переходы, перемежаемость как непрерывный переход от регулярного движения к хаотическому. Важно, что геосистема способна формировать различные пространственно-временные структуры активности, некоторое автоволновое поле. Геометрический (спонтанный) шум в такой системе — это универсальный эффект, обусловленный только наличием диффузии. Для систем такого рода типичным является высококоррелированное поведение их подсистем, самоорганизованный характер критичности, которым обладают только многомасштабные иерархически организованные системы, наличие в них медленной динамики, миграции деформационной активности, режимов с обострением. При этом с приближением к критической точке перехода резко возрастает время релаксации отклонений в стационарном состоянии системы и радиус корреляции флуктуаций. В их спектре начинают преобладать низкие частоты.

Фундаментальное свойство геосистем — степенные зависимости распределения сильных сейсмических событий и наличие стадии их подготовки: с приближением к событию происходит аномальный рост флуктуаций и так называемое критическое замедление (эффект резонанса на нулевой частоте), уд-

линение шкалы времен релаксации, увеличение крупномасштабных флуктуаций при подавлении мелкомасштабных, наличие локальных зон затишья и формирование диссипативных структур (цугов медленных деформационных фронтов). Важно, что эти закономерности и признаки универсальны и, в принципе, подлежат экспериментальной диагностике. С этой точки зрения в качестве ближайшей задачи можно считать организацию мониторинговых наблюдений на иерархических уровнях организации геосистем, развитие адекватных методов обработки массивов получаемых данных, постановки и сочетания активных и пассивных мониторинговых сетей. По причине разнообразия специфических ситуаций и наличия шумов мониторинг должен включать комплексные исследования процессов и состояния геосистем на глобальном уровне — от верхней мантии до поверхностного слоя земной коры, связей коровой сейсмичности с глубинными процессами дегазации, формирования крупномасштабных структур разрушения и контроля их эволюции.

Очевидно, можно предположить, что процессы нарастания низкочастотных мод в спектре шумов геосистемы могут быть экспериментально диагностированы наземными (в частности, точечными, локальными) наблюдениями, в то время как слежение за ростом обобщенной синхронизации и процессами смены топологии (образа) пространственно-временной «энергетической» структуры спонтанно эмиссионной природы, в определенном смысле изоморфной структуре и динамике геосистем (подсистем) различных уровней и типов организации, — задача площадных, в том числе и аэрокосмических мониторинговых систем. В то же время, учитывая требуемую надежность и точность краткосрочного прогнозирования конкретных сейсмических событий, пассивные мониторинговые системы должны быть дополнены активными [Шуман, 2014г].

В этом контексте основные методы многопараметрического аэрокосмического мониторинга предвестников («химического потенциала») ионосферного отклика, линейных облачных структур и другие [Пулинец и др., 2013] ввиду их специфического проявления могут служить, по нашему мнению, в качестве по-

лезного компонента, дополнения к рассматриваемой общей схеме. Но даже в этом случае пока остаются, так сказать «за кадром», и ждут своего решения вопросы энергетики сейсмических событий и миграции их гипоцентров. Однако понятно, что подходы, ограниченные рамками чисто сейсмологических наблюдений или концепциями литосферно-атмосферно-ионосферных связей с использованием исключительно спутниковых технологий и не использующих на количественном уровне сейсмологические данные, не дают повода для оптимизма.

Заключение. Развитие теории динамических систем во второй половине XX в., синтез дробной динамики и фрактальной топологии привели к важным следствиям и в физике, и в ряде геофизических приложений. В частности, на этой основе и с учетом быстрого накопления экспериментальных данных предпринимались многочисленные попытки построения новой концепции функционирования геосреды. Разработана концепция о геофизической среде [Садовский, 2004], суть которой — ее иерархическая неоднородность, активность, нелинейность (физическая, геометрическая, структурная), возможность изменения физических свойств во времени, способность геофизических полей и процессов в ней взаимодействовать между собой. Эти представления о геосреде как нелинейной динамической системе и построенная на этой основе новая концепция геодинамики позволили создать новые эффективные методы геофизической разведки [Николаев, 2002; Кузнецов, 2009], системы мониторинга природных и природно-техногенных процессов, прогноза сейсмической активности, которые сегодня востребованы и находят широкое применение.

Общие свойства геосреды как нелинейной динамической системы — это свойство СОК и высоко коррелированного поведения ее подсистем. При этом пространственная локализация распределения параметров в системе ведет к локализации процесса во времени [Макаров, 2012]. Концепция СОК, которой обладают только многомасштабные иерархически организованные системы, привела к изменению взглядов на динамику таких систем, формулировку условий и критериев разрушения

деформируемых твердых тел. Установлено, что разрушению предшествует более или менее длительный подготовительный период. Эта концепция нашла отражение в том, что метастабильность и устойчивые переходы — это ключевые динамические объекты, способные перевести моделирование динамики геосреды на новый уровень понимания и, возможно, прогноза поведения. С этой точки зрения и сейсмичность, и спонтанная электромагнитная эмиссия литосферы — это непрерывные во времени динамические процессы, обусловленные взаимодействием различных подсистем геосреды, их синхронизацией во времени и подавлением одних колебательных мод другими. При этом спонтанная эмиссия является отражением собственной эволюции геосреды, а ее спектр отражает стадию этой эволюции и характеризует меру энергонасыщенности системы. Соответственно, слежение за спектром шумов в системе дает, быть может, самые естественные и доступные для реализации подходы к решению проблем прогноза и прогнозируемости сейсмического процесса, причем спектр сингулярностей в отличие от спектра мощности или корреляционной функции процесса содержит информацию о локальной структуре эмиссионного процесса.

Критические явления в системе обусловлены высокой восприимчивостью: рост восприимчивости и флуктуаций в системе с преобладанием низкочастотных мод наблюдается в условиях близости ее параметров к режиму с обострением, причем этот максимум в спектре пульсаций, в отличие от фликкер-шума, исчезает при удалении параметров системы от точки бифуркации [Руманов, 2913].

Очевидно, в столь сложной динамической системе, как геосреда, мониторинг ее динамики должен осуществляться на иерархических уровнях ее организации и включать комплекс регистрации ее параметров, процессов и состояния на глобальном уровне — от верхней мантии до земной поверхности, изучение связей коровой сейсмичности с глубинной дегазацией, анализа возможностей формирования крупномасштабных структур разрушения и контроля их эволюции. Привлечение дистанцион-

ных аэрокосмических методов мониторинга вызвано сложностью объекта исследования, трудностями локализации зон активизации в пространстве и времени, высокой стоимостью масштабных мониторинговых систем. Здесь в центре дискуссий о комплексных связях в системе литосфера—атмосфера—ионосфера стал вопрос о выносе из земных недр инертного, но радиоактивного газа радона, запускающего цепь процессов в этой системе, ответственных за появление различных типов краткосрочных и среднесрочных предвестников землетрясений. Но это не прогноз сейсмического события в его классическом, традиционном смысле. Метод не ориентирован на получение прямых сведений о состоянии геосреды и происходящих в ней процессах. Это, скорее, прогноз и констатация особенностей временной и пространственной динамики радонового поля, развития обусловленного им процесса от поверхности земли до магнитосферы, включая такие параметры, как вертикальный профиль температуры и влажности, и электронной концентрации, локальные параметры ионосферной плазмы, потока инфракрасного излучения, конфигурацию облачного покрова и др. [Пулинец, Узунов, 2011; Пулинец и др., 2012].

Но, как известно, газ радон выделяется в значительных количествах и тогда, когда нет и не предвидится никакой сейсмической опасности, по крайней мере, в краткосрочной перспективе. К тому же соответствующие изменения параметров в рассматриваемой системе литосфера—атмосфера—ионосфера достаточно малы и, вообще говоря, в ряде случаев обнаруживаемы только статистически. В итоге, несмотря на привлекательность спутниковых мониторинговых систем, они не решают проблему достаточно точного и надежного краткосрочного прогноза без должного понимания физики формирования очагов разрушения и закономерностей локализации деформационных процессов в земной коре. При этом трудности решения проблемы прогноза возрастают в связи с синергетическими эффектами в деформационном отклике геосреды на различные внешние и внутренние энергетические воздействия, в частности полей напряжений и диффузионного потока легких газов

из низов литосферы, совместного воздействия сигналов и шумов на геосистемы. В столь сложной ситуации пассивный мониторинг весьма перспективно может комплексировать с активным, включая контроль восприимчивости геосистем. Очевидно, полученные на его основе экспериментальные данные могут пролить свет и приблизить нас к пониманию физических процессов в геосистеме. Разумеется, и в этом случае сейсмические методы контроля остаются ведущими при диагностике глубинного строения сейсмоактивной области и изменения ее параметров.

О концептуальных основах диагностики и мониторинга геосистем

Геофизический журнал,
№ 4, Т. 37, 2015, С. 93—103.

Введение. Как известно, определение тенденций развития геосистем и диагностика их динамических состояний — одна из актуальнейших задач современной геофизической науки. Все современные методы прогноза эволюции основаны на методах физического моделирования и мониторинге реальных процессов. Именно в этом контексте попытки динамического описания геосистем, традиции моделирования процессов на базе теории динамических систем, сами методы нелинейной динамики оказались востребованными для анализа данных геофизического эксперимента и мониторинга. К настоящему времени основные теоретические и методологические положения, организации систем контроля и мониторинга литосферы достаточно известны и освещены во многих работах, опубликованных в последние годы (см., например, [Гуфельд, Новоселов, 2014; Гульельми, 2015] и цитируемую там литературу). Тем не менее круг проблемных вопросов, требующих дальнейших экспериментальных и теоретических исследо-

ваний в этой области для реальных геосистем как совокупности компонентов литосферы, объединенных потоком энергии и вещества, открытых, со сложной динамикой, остается весьма широким. Вероятно, трудности понимания, объяснения и описания тенденций развития динамических состояний геосистем, их локального контроля и диагностики состоят, прежде всего, в онтологической сложности исследуемых систем и многофакторности действия на них физических полей различной природы. Как известно, соответствующие определения весьма сложны и, что существенно, не всегда однозначны. В некоторых случаях эта эмпирика без должного теоретического обоснования. В итоге, что странно, во многих, даже вышедших в самое последнее время многочисленных публикациях, хотя и подчеркивается ключевая роль представлений нелинейной динамики при постановке и решении рассматриваемых вопросов, ее аппарат использовался весьма избирательно и фрагментарно. Стала отчетливо проявляться неадекватность существующих методов мониторинга реальной энергонасыщенной геосреды [Шуман, 2014б,г, 2015]. Задача мониторинга стала пониматься в качестве исследования отклика геосистемы на многочастотные (приливы и др.) и шумовые сигналы, причем осуществлять его на иерархических уровнях организации геосистемы. Возникла необходимость отбора из огромного имеющегося материала мониторинговых наблюдений, и его приходится проводить с известной долей произвола, когда существенными критериями становятся интересы авторов. Характерный пример такого рода — краткосрочный прогноз сейсмичности, в частности крупных сейсмических событий в реальной геосреде, который оказался значительно более сложной и неопределенной задачей, чем это предполагалось многими исследователями [Шаповал, 2011; Гуфельд, Новоселов, 2014].

Основная причина — весьма широкий комплекс нерешенных вопросов физики землетрясений [Гульельми, 2015]. Сама же нелинейная динамика лишила нас иллюзии глобальной предсказуемости.

В рассматриваемом контексте напомним ситуацию, воз-

никшую в связи с появлением теории самоорганизованной критичности (СОК) — одну из новейших теорий нелинейных динамических систем [Бак, 2014]. Как известно, парадигма СОК — эволюции геосистемы к критическому состоянию без настройки каких-либо ее параметров — сразу привлекла к себе повышенное внимание геофизиков. Прогнозные свойства этой модели оказались в центре дискуссии о прогнозируемости сильных сейсмических событий, полагая, что процесс их подготовки порождается типичной системой с СОК [Шаповал, 2011; Шаповал, Шнирман, 2011].

Однако вопрос о существовании эффективного прогноза в системах с СОК остается весьма дискуссионным. С одной стороны, утверждается, что обширный класс сложных систем с СОК предсказуем с помощью некоторых универсальных предвестников [Шаповал, 2011], а с другой — «…понимание сейсмического процесса как фундаментального следствия эволюции сейсмотектонической системы к состоянию СОК, в котором невозможен реальный прогноз динамики и катастроф» [Захаров, 2014]. Не вникая в детали этой дискуссии, заметим лишь, что на данный момент эффективного критерия обнаружения СОК в реальной геосистеме все еще нет, а сама задача о прогнозируемости систем с СОК теоретически весьма сложна и исследуется эмпирически [Шаповал, 2011]. Очевидно, в связи с разнообразием нелинейных эффектов и процессов в неравновесных активных динамических системах в последние годы активно обсуждается возможность создания неких объединяющих концепций, в частности самоорганизации и диссипативных структур, синергетики, автоволн и автоструктур, теории катастроф.

Актуальная задача — исследование синхронной динамики сложных систем и изучение влияния шумов на синхронизацию, «конкуренции» между собой различными типами самосогласованного поведения их подсистем. Но поскольку интересы математиков, физиков и геофизиков не всегда канонизированы или параллельны, естественно появляется желание прибегнуть и по возможности ограничиться менее изощренной системой поня-

тий и представлений, более адаптированных к реальному мониторинговому эксперименту. Таким образом, итог, в сущности, может быть сведен к координации и перегруппировке некоторого известного и, возможно, ограниченного набора теоретических результатов и экспериментальных фактов, не претендуя на большее. В то же время весьма проблематично даже упомянуть все многообразие исследований по этой теме. Напомним лишь, что реализация в геосреде того или иного сценария или механизма деформирования, а, как следствие, и способа релаксации напряжений, особенностей перехода разрушений в закритическую (катастрофическую) стадию (в режим с обострением, согласно терминологии нелинейной динамики) определяется в конечном счете уровнем и скоростью подводимой энергии и топологией дефектов на каждом пространственном масштабе. При этом присущая многим сейсмическим явлениям масштабная инвариантность, очевидно, связана с масштабно-инвариантными свойствами процессов разрушения, что, в принципе, дает дополнительные возможности их использования для прогноза сейсмичности [Зосимов, Лямшев, 1995].

Ввиду сложности проблемы сосредоточим далее внимание на ее частном аспекте, а именно: что нового дают идеи и подходы нелинейной динамики и изучение особенностей и механизмов формирования очагов разрушения в геосреде для теоретического обоснования и экспериментальной реализации мониторинговых наблюдений с целью диагностики сейсмотектонических систем. Что для этого необходимо и что, возможно, позволит продвинуться в исследованиях по прогнозу сейсмичности (в том числе и краткосрочном), а также почему классические подходы оказались не готовыми к решению рассматриваемых многомасштабных задач. Как известно, классические подходы оказались приемлемыми лишь для исследовательских целей, а при реализации функции контроля, предназначенного для оперативной реакции на критические геодинамические явления, оказались малоэффективными. По этой причине разработка некоего единого подхода, общего взгляда на эту проблему имеет несомненный методологический и прикладной аспект.

О мониторинге и диагностике состояний геосистем. Как известно, все современные методы прогноза эволюции реальных систем базируются на результатах физического моделирования и мониторинга реальных процессов. В последние годы отмечается появление работ, в которых анализируются особенности эволюционных процессов реальных объектов на основе численных решений уравнений метафизики, являющихся физически обоснованными моделями этих процессов [Макаров, 2012]. В частности, внимание концентрируется на особенностях и новых возможностях, которые дают идеи и подходы нелинейной динамики для решения прикладных задач.

Заметим также, что до настоящего времени методы прогноза эволюции геоструктур строятся, в основном, на анализе сейсмических каталогов. В этом контексте понятен повышенный интерес к СОК, связанный, очевидно, с ее универсальными свойствами (в определенных пределах). Стали понятны и эти пределы: стационарность модельной системы, демонстрирующей свойство СОК, имеет место на чрезвычайно длинных временных интервалах, соответствующих десятилетиям эволюции сейсмического процесса, а алгоритмы прогноза, основанные на адаптивных предвестниках, предсказывают порядка 80 % целевых событий, причем доля тревоги составляет около 25 % [Шаповал, 2011]. Весьма вероятно, это свидетельствует о том, что информация, содержащаяся в сейсмических каталогах, является неполной и недостаточной для реального успешного прогноза. В связи с этим высказана идея о необходимости перехода от анализа потоков событий (каталогов) к совместному анализу многомерных временных рядов, получаемых на большом числе пунктов наблюдения, покрывающих всю сейсмически опасную территорию [Любушин, 2011а]. Стало предельно ясно, что предикторы сейсмических событий, обладающие определенной надежностью, вообще говоря, могут быть получены только из теоретических представлений о физике процессов. Но для этого необходимы новые идеи и подходы как при развертывании мониторинговых сетей, комплексирования методов, так и при анализе их результатов [Шуман, 2014б, 2015].

Имеются весомые основания предполагать, что геосреда как самоорганизующаяся диссипативная система, оперирующая вдали от термодинамического равновесия, в зависимости от скорости, с которой поступает в нее энергия и вещество, может быть представлена в виде автоколебательной системы, в которой реализуются нелинейные пространственно-временные процессы. Оказалось, что пространственная локализация распределения параметров в ней ведет к локализации процесса во времени. Весьма существенно, что эволюция процессов и объектов в литосфере не может рассматриваться за рамками автоволновых процессов, являющихся пространственно-временными структурами. Особенность литосферы — фрактальность ее комплексов, когерентность поведения подсистем, адаптация их ансамблей к энергомассопотоку. Однако такие системы характеризуются не только термодинамическими параметрами, но и скоростью их изменения во времени и пространстве, определяющей эти потоки (процессы переноса) и термодинамические силы (градиент температуры, концентрации и др.). Типичными для таких иерархических неравновесных систем являются высококоррелированное поведение их подсистем и возникновение длинных причинно-следственных связей. Примечательно, что рассматриваемые пространственно-временные структуры со своей временной динамикой в определенных рамках не зависят от начальных и краевых условий, носят в определенном смысле универсальный характер и подлежат экспериментальной диагностике. Это пространственно-временные структуры активности, в том числе и хаотические, представляющие собой импульсы и фронты возбуждения, неустойчивость и взаимодействие которых приводит к установлению в системе самоподдерживающихся колебаний с определенной пространственной конфигурацией. Природа эмиссии — трансформация собственной энергии геосреды в различные локально неустойчивые состояния, которые, собственно говоря, и становятся источниками излучений различной физической природы. Сейсмическая, сейсмоакустическая и электромагнитная эмиссия литосферы — результат активных процессов, воз-

никающих в результате изменений в организации геосреды и характере связей между ее различными подсистемами. При этом спонтанное эмиссионное излучение, в отличие от вынужденного, не зависит от внешних воздействий и определяется только свойствами самой геосистемы. Можно предположить, что и сейсмическое, и сейсмоакустическое, и электромагнитное излучение — это динамический отклик геосреды на пронизывающий ее тепловой поток и восходящий поток легких газов из низов литосферы.

Существенно, что данное непрерывное излучение, регистрируемое в геосреде в чрезвычайно широком частотном диапазоне, свидетельствует об исключительно высокой энергонасыщенности литосферы, а фрактальная структура сигналов дает основание искать механизмы его генерации как некоторого критического неравновесного процесса. Здесь необходимо, разумеется, учитывать возможность различного физического содержания процессов генерации на разных масштабных уровнях геометрически самоподобной блоковой системы геосреды, причем каждый из ее элементов генерирует последовательность импульсов с различным интервалом следования и пространственной конфигурацией со стоячими волнами.

Весьма вероятно, что этот спонтанный сейсмоакустический и электромагнитный шум литосферного происхождения может быть истолкован в терминах автоколебаний, сама же структура спектра колебаний определяется масштабами, ограничивающими диапазон проявления фрактальных свойств, и значением спектральной размерности [Кадомцев,1994; Зосимов, Лямшев, 1995].

Активность и нелинейность геосреды порождает интенсивное взаимодействие эмиссионных и внешних полей, причем и сейсмичность, и сейсмоакустическая и электромагнитная эмиссия являются проявлением метастабильного состояния вещества земных недр и обладают высокой чувствительностью к внешним воздействиям. При этом флуктуационно-диссипативная теорема, согласно которой механизм любой диссипации является одновременно и механизмом рождения флуктуаций, свя-

зывает флуктуации геосистемы с ее диссипативными свойствами [Кадомцев, 1994].

Как известно, с изменением интенсивности потока энергии и вещества из низов литосферы в рассматриваемой геосистеме происходит качественная перестройка имеющихся диссипативных или автоволновых структур. В итоге эмиссионное сейсмоакустическое и электромагнитное излучение отражает собственную эволюцию геосреды, а его спектр — стадию этой эволюции и зависит от параметров ее структуры.

Таким образом, в геосистеме в целом формируется некоторое обобщенное автоволновое поле, самоорганизующееся за счет энергетических потоков из земных недр и элементарных энергетических полей ее отдельных подсистем и блоков, тесно связанное со строением и динамикой геосреды и, в частности, с топологией ее межблочной структуры. С этой точки зрения слежение за спектром эмиссий в системе во времени и бифуркациях автоструктур в пространстве приобретают особую значимость, так как позволяют приблизить и конкретизировать постановку задачи и реализацию геофизического мониторинга к экспериментальной ситуации. В этом контексте исследование спонтанной эмиссии имеет самостоятельное значение как с точки зрения изучения закономерностей и механизмов ее генерации, так и получения информации о свойствах геосреды, условиях ее деформирования и энергообмена, прогноза эволюции [Шуман, 2012в, 2014б,г, 2015]. Заметим также, что сам спонтанный шум в геосистеме, как и шумы внешней природы, выступает в роли конструктивного фактора, вызывающего рост степени когерентности или степени порядка в ней. В этом контексте обратим внимание на эффект стохастического резонанса, определяющего группу явлений, при которой отклик нелинейной динамической системы на слабое внешнее воздействие заметно усиливается с ростом интенсивности шумов в системе [Анищенко и др., 2010].

Самоорганизованная критичность и сейсмический процесс. Как известно, термин СОК стал частью физического лексикона и привлек к себе повышенное внимание сейсмологов

сразу после разработки П. Баком, Тангом и Визенфельдом ее первой модели, демонстрирующей это свойство — «куче песка», конус которой при подсыпке формируется в результате сброса избыточной массы в лавины [Bak et al., 1987]. Многие полагают, что СОК — первая общая теория сложных систем, базирующаяся на относительно развитой математической модели. Ее суть состоит в том, что по мере эволюции нелинейной динамической системы она неизбежно приближается к критической точке (точке бифуркации). Наличие СОК означает стремление системы к метастабильному квазиравновесному состоянию, включая и переход к такому состоянию через катастрофы различных масштабов.

Очевидно, интерес к СОК связан не только с ее универсальностью и прогнозными свойствами (в некоторых пределах), но, вероятно, и с необходимостью понять наиболее общие черты и закономерности в поведении сложных нелинейных динамических систем, обнаруживающих самосогласованное стремление к критическим режимам. Как известно, «предпочтение», отдаваемое системой критическим режимам, обусловлено, по-видимому, их относительно термодинамической выгодностью: свободная энергия ее ансамблей подсистем понижается при формировании пороговых образований. В то же время, как отмечает П. Бак, в модели СОК в своем большинстве «…имеют дело с абстрактными сущностями и их построение и исследование может трактоваться скорее как создание языка, нежели как описание реальных систем» [Бак, 2014]. Здесь доминирует парадигма прогнозируемости, основанная на принципе СОК: предполагается, что сейсмотектонические процессы могут быть отнесены к классу систем с СОК. Однако на данный момент эффективного критерия обнаружения СОК в системе нет. Обычно переход системы к СОК сопровождается появлением характерного «розового» шума (или фликкер-шума) на низких частотах $\sim f^{-1}$. Спектр такого шума примечателен тем, что его спектральная плотность (энергия, которая приходится на один герц частоты) с падением частоты ведет себя обратно пропорционально некоторой экспоненте с показателем, близким к

единице. При этом концепция СОК представляет розовый 1/*f* шум вследствие достижения сложной системой критического состояния, к которому эта система склонна приходить. П. Бак по этому поводу отмечает: «…мы пришли к выводу, что шум 1/*f* должен быть кооперативным феноменом, когда различные элементы большой системы действуют вместе каким-то согласованным образом» [Бак, 2014]. Особенность систем с розовым 1/*f* шумом состоит в том, что значительная часть энергии флуктуаций в системе связана с очень медленными процессами и означает возможность катастрофических выбросов в ней. Но всегда ли розовый шум в системе является достаточно «розовым»? Ведь вопреки предложениям П. Бака, его модель СОК демонстрирует критичность к начальным условиям. Возможно по этой причине среди некоторых профессионалов отмечается несколько неоднозначное, даже настороженное отношение к ней: несмотря на известный прогресс в исследовании СОК, многие ее актуальные проблемы все еще остаются нерешенными. Переход к неравновесному стационарному состоянию является весьма сложным процессом взаимодействия между механизмами самоорганизации, определяющими ход эволюционных процессов, и эффектами динамической релаксации, отражающими роль диссипативных факторов в геосреде.

Согласно работе [Зеленый, Милованов, 2004], явление СОК как сингулярного неравновесного состояния в более расширенной трактовке можно понять в контексте фундаментальных физических принципов, в частности принципа наименьшего действия. Для достижения системой такого состояния воздействия на нее должны быть как можно медленными. Именно в этом случае стремление системы к состоянию СОК становится универсальным явлением, не зависящим от специфики системы. Тем самым устанавливается соответствие СОК «…фундаментальным физическим принципам, лежащим в основе современной теории динамических систем» (разумеется, при соответствующих ограничениях по частоте; с увеличением частоты шумы в системе, как правило, темнеют) [Зеленый, Милованов, 2004].

Не удивительно, что прогнозные свойства геосистем с СОК оказались в центре дискуссий о прогнозируемости сейсмичности. Некоторые исследователи до сих пор продолжают утверждать о невозможности прогноза систем с СОК, если основываться на законе Гутенберга—Рихтера, причем его (прогноза) ограниченность заложена в самой природе геосистем [Захаров, 2014]. Однако, несомненно, существуют некоторые наиболее общие закономерности в поведении сложных нелинейных динамических систем, обнаруживающих самосогласованное стремление к критическим режимам. В частности, эмпирический анализ указывает на возможность весьма эффективного в определенном смысле прогноза в системах с СОК, а представления о самоорганизации сейсмического процесса согласуются с предсказуемостью наиболее сильных событий [Шаповал, 2011]. Однако эффективность такого прогноза в реальном времени зависит от локальной нестационарности процесса и является неоднородной, причем стационарность такой модельной системы имеет место лишь на чрезвычайно длинных временных интервалах, что вполне согласуется с требованием медленности изменений внешних воздействий на геосистему. Но, во-первых, требование медленности изменений в геосистемах не всегда выполняется, и сколько бы мы ни накапливали информацию об их поведении, всегда найдутся некоторые неучтенные или неизвестные процессы, которые будут сказываться на временах, соизмеримых со временем изучения системы. Во-вторых, реализация в геосреде того или иного способа релаксации накопленных напряжений и, как следствие, формирование очага сейсмического события определяются как уровнем и скоростью изменений пронизывающих систему потоков энергии и вещества, так и топологией дефектов на каждом пространственном масштабе геосреды. Можно предположить, что изучение последствий влияния этих факторов потребует разработки новых моделей, методов и, что не менее актуально, адекватных образов и понятий, единых для неравновесных систем более общего типа, которые, возможно, могут иметь решающее значение для постановки будущих работ. В частности, интерпрети-

руя сейсмичность как результат устойчивой переходной активности геосреды с конечной плотностью энергетических потоков, имеются весомые основания предположить, что ее описание окажется эффективным на уровне переходных мод и метастабильных состояний, обусловленных и связанных с взаимодействием ее подсистем, их синхронизацией и подавлением одних колебательных мод другими. Становятся особенно актуальными исследования синхронной динамики подсистем или элементов геосреды, влияния шумов на синхронизацию, особенностей превращения одних пространственно-временных структур в другие при изменении параметров геосистемы, «бифуркаций» их пространственных образов.

Геосреда и автоволновые процессы. Как уже отмечалось, полученные в последние годы результаты обширных теоретических и экспериментальных исследований дают весомые основания для физического рассмотрения литосферы Земли как пространственно-структурированной существенно многомасштабной открытой энергонасыщенной геосистемы с нелинейной динамикой. Как известно, нелинейная динамика значительно расширила в это время свои рамки. Ее основная задача — поиск закономерностей, по которым функционируют ее отдельные составляющие или подсистемы, и взаимодействует между собой, порождая коллективное, согласованное поведение, т. е. как эти подсистемы эволюционируют и самоорганизуются. Показано, что в ансамблях взаимодействующих элементов различной природы можно выделить два взаимоисключающих друг друга процесса: а) синхронизацию, в результате которой вырабатывается приемлемый для взаимодействующих элементов и подсистем общий ритм активности, и б) конкуренцию, когда происходит подавление активности одного или группы элементов другим, более энергетически мощным в данный момент элементом или ансамблем. Стало очевидным, что проблема сейсмичности тесно связана с решением ключевых проблем в физике и механике разрушения, причем любой прогноз разрушения в принципе невозможен без учета его многомасштабной иерархической природы [Панин и др., 2012].

Одна из причин интереса к этому кругу проблем связана с попытками поиска новых экспериментальных возможностей диагностики геосистем и их динамических состояний. Ясно, что для их решения и корректной постановки проблем прогноза разрушения необходимы новые идеи и подходы, которые и были сформулированы в рамках нелинейной динамики и механики, физической мезомеханики и неравновесной термодинамики. Весьма важно, что при термодинамическом подходе не имеет принципиального значения природа источника напряжений в земной коре. Само же формирование возможного очага разрушения связывается с процессами, снижающими скорость диссипации энергии, а следовательно, и скорость роста энтропии в системе. Это — процесс, удовлетворяющий в некоторой области открытой неравновесной системы принципу минимального производства энтропии. При этом процесс самоорганизации функционирует на принципе минимального производства энтропии (вдали от равновесия), а рождение локальных состояний с низкой энтропией в конечном итоге ведет к ускорению общего роста энтропии всей системы.

Заметим, что возникновение диссипативных структур носит пороговый характер, который неравновесная термодинамика связывает с неустойчивостью: новая структура всегда является результатом неустойчивости и возникает из флуктуаций [Кадомцев, 1994].

Диссипативные структуры — это упорядоченные и самоорганизованные образования в системах, далеких от равновесия, обладающие определенной формой и характерными размерами, устойчивые относительно малых возмущений. Для своего существования они требуют постоянного притока энергии (энергетической подпитки). Важнейшие их характеристики — время жизни, область локализации и фрактальная размерность (как известно, диссипативные твердотельные структуры, самоорганизующиеся в открытых системах, являются фрактальными). Их характерные признаки — самоподобие, масштабная инвариантность, структурная иерархия. При этом автоволновые процессы являются одним из важнейших факторов самоорганизации в

термодинамически открытых неравновесных системах. Существенно, что сами сейсмические события, а также их форшоки и афтершоки связываются с трансформацией автоволновых структур в диссипативные структуры обострения.

Следует упомянуть, что под автоколебательной системой обычно понимают систему, в которой происходит преобразование энергии квазипостоянного (неколеблющегося) источника энергии в энергию колебаний (осциляторных, близких к гармоническим, и релаксационных или разрывных). Именно эти релаксационные автоколебания с частичным сбросом энергии в виде сейсмоакустических и электромагнитных возмущений изменяют фон регистрируемых естественных полей. Эти эмиссии также обладают ярко выраженными свойствами нелинейных процессов, способностью к периодической самоорганизации и хаотизации, характерному поведению в периоды приближения к точке бифуркации и выходе из нее. По этой причине в последние годы сейсмоакустическому и электромагнитному шуму придается большое значение как с точки зрения изучения механизмов его генерации и механизмов распространения, так и получении информации о свойствах геосреды, условиях ее деформирования и тенденцией развития. С этой точки зрения электромагнито- и акустосейсмогеодинамика рассматривает природу сейсмичности как результат развития земной коры и всей литосферы с учетом их глубинного строения, иерархически-блочной структуры, напряженно-деформированного состояния и процессов разрушения последовательности катастроф нарастающих масштабов. При этом индикаторами такого крупномасштабного катастрофического события в земной коре, согласно работе [Макаров, 2011], могут служить:

– замирание деформационной активности в ближайшей окрестности формирующегося магистрального разрыва;

– генерация в этой зоне формирующегося очага разрушения цугов деформационных фронтов и их концентрации в местах формирующегося разрыва.

И все же широкий комплекс вопросов физики сейсмического процесса остается нерешенным [Гуфельд, Новоселов,

2014]. Очевидно, наиболее трудными из них являются вопросы глубокофокусных землетрясений, очаги которых формируются в мантии, причем даже умеренные оптимистические ожидания в их решении в ближайшей перспективе все еще явно опережают реальный прогресс в этой области исследований. В частности, пока не нашли решения важные вопросы формирования автоколебаний, автоволн и автоструктур в неравновесной диссипативной геосреде, не известны с достаточной полнотой механизмы их пространственной локализации, бифуркации их пространственных образов, актуальных с точки зрения развития мониторинговых наблюдений. Однако рассмотренные идеи и полученные на их основе качественные результаты являются определяющими для понимания физики процесса разрушения и могут служить концептуальной основой постановки мониторинговых наблюдений.

Мониторинг и прогноз как проблема физики. Так как для большинства сложных динамических систем, с которыми обычно имеют дело в естественных дисциплинах, вывести какие-либо уравнения непосредственно из общих физических принципов, как правило, не удается, их изучение, особенно при экспериментальных исследованиях, «…часто реализуется посредством обработки сигналов, произведенных системой» [Лоскутов, 2010]. Очевидно, наличие только временных рядов (последовательности значений некоторых переменных, которые могут быть зарегистрированы экспериментально в непрерывном или дискретном режиме через некоторые промежутки времени) при отсутствии соответствующих уравнений сильно ограничивает возможности изучения системы и прогноза ее динамики. Однако видна и привлекательность такого подхода: в этом случае нет необходимости в построении соответствующей модели, описывающей динамику исследуемых рядов [Лоскутов, 2010]. Требуется лишь достаточная «длина» временного ряда и малость шумовой составляющей. Разработан ряд методов прогноза, имеющих целью по измеренным значениям временного ряда предсказать будущие значения этих характеристик, в которых на основе статистического анализа предлагалось исполь-

зовать авторегрессию, скользящее среднее и др. Но с развитием нелинейной динамики стало ясно, что задача прогноза значительно более сложна и выходит за рамки этих простых схем. Позднее, уже с учетом нелинейной динамики, появились новые практические методы и построен ряд алгоритмов такого прогноза, в частности на основе моделей «куча песка» (СОК). При этом предсказуемость рассматривалась как универсальное свойство временных рядов произвольной природы — сейсмических каталогов, финансовых индексов на биржах и др. [Шаповал, 2011; Шаповал, Шнирман, 2011]. Предполагалось также, что все эти системы прогнозируемы благодаря их колебаниям вокруг критической точки, причем один и тот же алгоритм может быть применен к прогнозу экстремальных событий временных рядов весьма различной природы — сильных сейсмических событий, крахов на биржевых рынках, наступления рецессий и др. [Шаповал, 2011]. Тем не менее, хотя эффективный прогноз сильных сейсмических событий и не противоречит СОК [Шаповал, 2011], их краткосрочный прогноз оказался более сложной задачей, чем это следует из этих моделей [Гуфельд, Новоселов, 2014].

Что же нового привнесли идеи и подходы нелинейной динамики и физической мезомеханики для изучения особенностей и механизмов формирования очагов разрушения в литосфере, решения практических задач мониторинга и прогноза сейсмичности, прежде всего краткосрочного? Как известно, именно этот прогноз представляет наиболее трудную проблему, в отношении которой все еще не существует установившейся точки зрения. В частности, как отмечали и Гуфельд, и Новоселов, «…не исключено, что точный краткосрочный прогноз вообще недостижим» [Гуфельд, Новоселов, 2014]. Но, как уже отмечалось, можно выдвинуть и контраргументы. Пессимизм здесь, очевидно, обусловлен сложностью и нетрадиционностью задач современной теории нелинейных неравновесных сред, возможно связанный с явлениями структурообразования и их динамикой. Как известно, особый класс неравновесных сред представляют так называемые возбудимые среды, которые

имеют некоторый конечный порог неустойчивости: для процессов структурообразования в подобных средах типично «саморазвитие» структур в пространстве, сосуществование локализованных возбуждений, мультистабильность, развитие пространственно неупорядоченных структур («пространственной» турбулентности) [Гапонов-Грехов, Рабинович, 1987б]. В этом контексте сейсмические события в некотором смысле ассоциируются с возбуждением в геосреде автоструктур большой амплитуды за счет внешнего энергопотока при определенном уровне шумов в геосистеме, а основные проблемы диагностики и мониторинга, вероятно, связаны с бифуркациями в пространственных ансамблях геоструктур. Следовательно, понимание сейсмического процесса как фундаментального следствия эволюции системы к состоянию СОК, как это обычно предполагается в большинстве работ этого цикла [Шаповал, 2011; Шаповал, Шнирман, 2011], оказывается весьма стесненным жесткими рамками систем с аномально медленной динамикой.

В итоге попытки исследования задачи о прогнозируемости систем с СОК исключительно эмпирически весьма проблематичны. В столь сложной ситуации на передний план в современных мониторинговых системах выходят задачи слежения за спектром шумов в геосистеме и бифуркации автоструктур. В первую очередь, это слежение за сменой топологии автоструктур, их пространственного саморазвития, а также процессами нарастания низкочастотных (мягких мод) в спектре ее шумов, который, разумеется, у каждой системы свой [Руманов, 2013]. Становится актуальной задача мониторинга восприимчивости системы (или обобщенной восприимчивости как характеристики отклика геосистемы на внешние воздействия). Исследования в приближении среднего поля в этой ситуации становятся неэффективными.

Заметим, что здесь мы сталкиваемся с весьма нетривиальной проблемой: как отличить фликкер-шум в системе от низкочастотного максимума шумов на нижних частотах, связанного с ростом восприимчивости системы в этом диапазоне частот. Весьма существенно, что этот максимум, в отличие от фликкер-

шума, исчезает при удалении параметров системы от точки бифуркации [Руманов, 2013]. При этом спонтанные эмиссии литосферного происхождения (и сейсмоакустическая, и электромагнитная), являющиеся отражением собственной эволюции геосреды, спектр которых отражает стадию этой эволюции, обладающие ярко выраженной способностью к периодической самоорганизации и хаотизации, характерному поведению при приближении к точке бифуркации и выходе геосистемы из нее, неизбежно оказываются в центре внимания современных мониторинговых систем.

Несомненно, проблема синтеза геоэлектромагнетизма и нелинейной динамики, сейсмоэлектромагнитных явлений как отражения механизмов пространственно-временной локализации и формирования автоструктур — относительно новая и перспективная область геофизических, в том числе и мониторинговых исследований. Но именно в этом контексте становится особенно заметной неадекватность существующих методов мониторинговых систем и выбора физически обоснованных параметров слежения. При этом сейсмоэлектромагнитные явления служат чувствительным индикатором процессов формирования очагов землетрясений и процессов разрушения в литосфере. Именно по этой причине, как уже отмечалось, сейсмоэлектромагнитному шуму как пространственно-временному феномену в последнее время придается самостоятельное значение не только с точки зрения механизмов его генерации и распространения, но, прежде всего, с точки зрения получения информации о геосреде, условиях деформирования и эволюции. Необходимость расширения экспериментальных исследований при таком подходе также очевидна.

Заключительные замечания. Подводя итог проведенному анализу, можно заключить, что быстрое развитие во второй половине XX в. теории сложных динамических систем, к которым могут быть отнесены и геосистемы, изучение особенностей и механизмов формирования очагов разрушения в земной коре в русле идей, подходов и методов нелинейной динамики и физической мезомеханики привели к значительному прогрессу в

описании процессов формирования очагов землетрясений, вопросов прогнозируемости и прогноза эволюции конкретных геосистем. В частности, исследованы теоретические аспекты прогнозируемости в математических моделях с СОК, демонстрирующих основные, грубые свойства сейсмического процесса. Получены весомые свидетельства того, что предшествующие сильным сейсмическим событиям явления (предвестники) существуют. На их основе построены алгоритмы среднесрочного прогноза, достаточно эффективно предсказывающего их наступление в реальном времени [Шаповал, 2011]. Установлено, что эволюция процессов и объектов в литосфере не может реализовываться вне рамок автоволновых процессов, являющихся пространственно-временными структурами. Получены весомые основания того, что реальная геосреда может быть представлена в виде автоколебательной системы, в которой реализуются нелинейные процессы как в пространстве, так и во времени. При этом в неравновесных средах, как правило, формируются не уединенные автоструктуры, а ансамбли таких структур.

Существенно, что, несмотря на широкое разнообразие контекстов, в которых реализуется динамика геосистем, существуют общие фундаментальные закономерности поведения, независимые от взаимодействий их локальных элементов и подсистем. Примечательно, что общие тенденции их развития и эволюции могут интерпретироваться в терминах сейсмического процесса, а проявляющаяся во временных рядах мониторинговых наблюдений динамика имеет общие черты с реальностью.

Тем не менее ряд ключевых вопросов, относящихся к формированию очагов сейсмических событий, особенно глубинных, их энергетики, миграции, генерации краткосрочных предвестников и краткосрочного прогноза все еще остаются открытыми и выглядят в ряде случаев весьма пессимистично или имеют мрачноватые оттенки. Остаются весьма актуальными исследования по формированию высокоорганизованных пространственно-временных структур в неравновесной, неоднородной геосреде — автоволн и автоструктур, их пространственно-временной локализации и бифуркации их пространст-

венных образов, особенностей отклика геосистем на многочастотные и шумовые воздействия различной интенсивности. Весьма примечательно, что отклик реальных геосистем на эти воздействия оказывается различным в зависимости от условий их самовозбуждения, обусловленного особенностями пронизывающего их энергопотока и нетривиальным характером динамики в зависимости от размеров системы.

В рассматриваемом контексте наиболее важным из того, что было изложено выше, это формирование в геосистеме некоторого обобщенного автоволнового поля, самоорганизующегося за счет энергомассопотока из низов литосферы (земных недр). При этом слежение за спектром спонтанных эмиссий (сейсмической, сейсмоакустической и электромагнитной) во времени и пространственных «бифуркаций» автоструктур, являющихся отражением эволюции сейсмотектонических систем, порождающих сейсмический процесс, а также координированных с ними измерений сейсмоатмосферных и сейсмоионосферных возмущений, выходят на передний план экспериментальных исследований в ближайшей перспективе. Весьма вероятно, что такой подход к определению целей, задач и способов мониторинга геосистем с целью краткосрочного прогноза сильных сейсмических событий является не только необходимым, но и неизбежным.

Сейсмоэлектромагнетизм и пространственно-временные структуры

Геофизический журнал,
№ 6, Т. 37, 2015, С. 24—41.

Введение. Как известно, вопросы прогнозируемости поведения геосистем и, в частности, прогнозы конкретных сейсмических событий имеют сравнительно давнюю историю, обширную библиографию и остаются весьма актуальными до настоящего времени [Гуфельд, Новоселов, 2014; Гульельми, 2015; Шуман, 2015]. Весьма вероятно, что основные проблемы, связанные с их решением, состоят, прежде всего, в сложности исследуемых геосистем и многофакторности действия на них физических полей различной природы. В то же время полученные в последние годы результаты определенно дают основания для физической трактовки литосферы Земли как пространственно структурированной существенно многомасштабной системы с нелинейной динамикой. Установлено, что геометрические структуры многомасштабных неоднородностей литосферы определяет не только пространственные свойства сейсмичности, но и ее энергетические и временные свойства. Эта система демонстрирует также ряд важных свойств сейсмического процесса, таких как сейсмический цикл, форшоко-

вая и афтершоковая активность, степенной характер убывания сейсмических событий после сильнейших событий (закон Омори для афтершоков) [Гульельми, 2015]. При этом сильным землетрясениям, как правило, предшествуют либо аномальное поведение сейсмической активности, либо ее аномальное понижение, либо их колебания в различных пространственно-временных зонах [Шаповал, Шнирман, 2011]. Однако детали сейсмического процесса с достаточной полнотой не изучены, не существуют и его общепризнанные физико-механические модели. В столь сложной ситуации получили широкое распространение методы изучения геосистем, основанные на анализе сигналов, генерируемых системой (временных рядов, в частности, каталогов землетрясений) без априорной информации о системе без построения специфической модели, описывающей динамику исследуемого ряда. По-видимому, задача прогноза в таком контексте относится к одной из старейших задач временных рядов [Лоскутов, 2010]. В такой постановке задачи был предложен и разработан ряд методик и алгоритмов прогноза, однако применительно к прогнозу сейсмичности они оказались малоэффективными. И дело здесь не в длине обрабатываемых рядов, которая, разумеется, должна быть достаточно большой. С развитием нелинейной динамики оказалось, что задача прогноза более сложная, выходящая за эти рамки. Весьма вероятно, что именно здесь, в этом контексте, мы нуждаемся в новых идеях описания и трактовки сейсмичности, и как раз здесь все еще отмечается относительно медленный прогресс.

Необходимость описания подобных систем и прогноза их эволюции привела к появлению множества работ, в которых были заложены основы теории самоорганизации. При этом использовались различные подходы и терминология: теория диссипативных структур или теория самоорганизации, синергетика, теория открытых систем и др. В дальнейшем под термином самоорганизация будем считать установление в диссипативной неравновесной открытой системе (геосреде) пространственных структур, эволюционирующих во времени, параметры которых определяются свойствами этой среды и слабо зависят от простран-

ственной структуры источника неравновесности (потоков энергии и вещества), начального состояния и условий на границах.

Согласно современной трактовке, теория самоорганизации включает термодинамику неравновесных (открытых) систем, синергетику, теорию катастроф. В свою очередь, в основу современной синергетики положены три парадигмы: диссипативных структур, динамического хаоса, сложности. Теория катастроф изучает особенности гладких отображений и бифуркаций динамических систем. При этом именно потоки энергии и вещество, пронизывающее систему, ведут к возникновению в ней эффектов самоорганизации — образования макроскопических диссипативных структур, причем это структурообразование характеризуется в широком диапазоне масштабов и параметров пространственно-временным скейлингом. Этот пространственно-временной скейлинг обычно характеризуется сильными, спадающими по степенному закону корреляциями, которые являются типичными для критических явлений [Зеленый, Милованов, 2004]. Как известно, исследования явлений подобного рода объединяются общим названием — самоорганизованная критичность, позиционирующая скейлинговый контекст самоорганизации [Aschwanden et al., 2014].

Как известно, концепция самоорганизованной критичности (свойства сложных нелинейных динамических систем в ходе своей эволюции приходить в критическое состояние) — одно из относительно новых направлений в теории таких систем. Ее суть состоит в том, что по мере развития нелинейной системы она неизбежно приближается к точке бифуркации, ее устойчивость резко снижается и в ней спонтанно создаются условия, при которых малые возмущения могут спровоцировать крупные события (катастрофу). Возникает естественная задача прогноза динамики геосистем в критическом состоянии. При этом предпочтение, отдаваемое критическим режимам функционирования систем, обусловлено их относительной термодинамической выгодностью. Однако, несмотря на заметный прогресс в изучении самоорганизованной критичности (СОК), многие актуальные проблемы, ассоциируемые с ней, до настоящего вре-

мени остаются нерешенными. Неудивительно, что в современной геофизической литературе отношение к ее применению весьма неоднозначно [Шаповал, 2011; Захаров, 2014].

По существу, все еще остается открытым вопрос: возможен ли в системах с СОК эффективный прогноз?. Может оказаться, что в зависимости от конкретной ситуации использование СОК при прогнозе сейсмичности будет как успешным, так и бесполезным. И это не удивительно, так как интерпретация сейсмического процесса в качестве фундаментального следствия эволюции геосистемы к состоянию СОК оказывается ограниченной рамками систем с некоторой характерной (аномально медленной) динамикой. К тому же в данный момент отсутствует эффективный критерий обнаружения (особенно экспериментального) СОК в системе. В итоге оптимистические ожидания здесь пока явно опережают реальный прогресс в этой области исследований.

Несомненно, исследование этих и близких явлений требует выработки новых моделей, методов и, что не менее важно, адекватных образов и понятий, общих для неравновесных сред произвольной природы. В частности, нелинейная динамика способствовала пониманию и трактовке сейсмического процесса как результата устойчивой переходной активности геосреды. С точки зрения геофизики сейсмичность — неравномерный во времени переходный процесс, нестационарная активность геосреды. Это — метастабильные состояния геосреды и последовательность метастабильных состояний, время существования которых достаточно велико. При этом основная идея будет состоять в том, чтобы описать сейсмический процесс в рамках его пространственно-временной трактовки в терминах автоколебаний. С этой точки зрения принятое сейчас понимание сейсмического процесса как фундаментального следствия эволюции сейсмотектонической системы к состоянию самоорганизованной критичности, очевидно, не вполне корректно и носит частный характер.

Автоколебания — это незатухающие колебания в нелинейной диссипативной системе, поддерживаемые внешними исто-

чниками энергии. Их вид и свойства определяются самой системой. Это, к примеру, могут быть процессы бифуркаций и синхронизации колебаний отдельных подсистем, их ансамблей, а также образование очагов хаоса и порядка в распределенных системах. При этом представляют интерес неоднородные ансамбли автоструктур, когда неоднородность неравновесной среды связана с наличием границ либо с действием внешних полей.

Итак, если сейсмичность может более адекватно интерпретироваться в качестве и терминах реализации некоторого нелинейного автоволнового процесса, на передний план выходят задачи теории переходов пространственных образов автоструктур. Однако исследование динамики пространственных ансамблей структур, проблемы, связанные с бифуркациями в пространственных ансамблях, много сложнее обычных задач теории бифуркаций динамических систем. Более того, по мнению [Гапонов-Грехов, Рабинович, 1987а,б], такая постановка задачи выглядит почти безнадежной: метастабильным образом в фазовом пространстве динамической модели отвечают уже не аттракторы, а переходные множества траекторий, внутри которых изображающая точка проводит основное время.

Важным является изучение синхронизации автоколебаний и влияния шумов на синхронизацию. Можно предположить, что сейсмическое событие обусловлено образованием автоструктуры большой амплитуды, формируемой в геосистеме за счет внешнего, возможно нестационарного воздействия (энергомассопотока), превышающего некоторый пороговый уровень, а слабый хаос — реализация мягкого режима возбуждения автоструктур. Возникают важные вопросы, в частности, что такое пространственный хаос и какую роль в его формировании играют пространственные структуры, как соотносятся и взаимодействуют между собой пространственный и временной хаос и как он, в свою очередь, может быть связан с эволюцией геосистем и взаимодействием их подсистем [Гапонов-Грехов, Рабинович, 1987а, б]. Однако аналитические возможности исследования автоструктур и динамики их ансамблей ограничены решением некоторых приближенных или модельных уравнений, а

численный эксперимент весьма затруднен. Необходимость экспериментальных исследований при таком подходе весьма актуальна. Становится очевидной неадекватность существующих методов исследования эволюции геосистем и методов их мониторинга. С этой точки зрения, возможно, исследование динамики пространственных ансамблей автоструктур в реальной геосреде может оказаться и неизбежным, и необходимым. Следует также упомянуть, что самоорганизация не является универсальным свойством геосистем, реализуется лишь в определенных особых условиях. В то же время наличие пространственно-временной структуры является ее всеобщим и фундаментальным свойством [Эбелинг, 1979]. С этой точки зрения идея описания сейсмического процесса в рамках пространственно-временного подхода или трактовок в терминах автоколебаний динамики пространственных ансамблей структур (автоструктур) не лишена оснований.

Возможно, такая постановка вопроса может показаться перефразировкой старых классических подходов к изучению сейсмичности. Но она не вполне корректна. Автоструктуры и бифуркации их статических образов в зависимости от параметров энергомассопотоков и уровня шумов в геосистеме, которые находят отражение в пространственно-временной структуре и динамике спонтанных эмиссий, генерируемых системой, — гораздо менее тривиальные объекты исследований, чем это считалось ранее, что создает немало трудностей при отборе материала для изложения. Такой отбор диктовался актуальностью вопросов, научными интересами автора и возможностью узнавать то, что, очевидно, многие знали уже раньше. Он позволял уклониться или обойти стороной многие конкретные вопросы прогноза сейсмичности и ограничиться значительно более скромными задачами, при этом отнюдь не минимизируя намеки на те тупики, с которыми обычно сталкивались при упоминании об ошибочных идеях, с которыми имели дело. Но в любом случае при решении ключевых вопросов прогноза и прогнозируемости геосистем сложно уклониться от рассмотрения дискуссионных вопросов в теории СОК, в частности ее универса-

льности, теоретических основ, новых тенденций развития и открытых проблем.

Самоорганизованная критичность и сейсмический процесс. Важный объект геофизических исследований — процессы в сильнонеравновесных открытых геосистемах. Имеются весомые основания предполагать, что в основу большинства проявлений геопроцессов могут быть положены общие свойства открытых нелинейных диссипативных систем. Потоки энергии и вещества, пронизывающие эти системы, обуславливают возникновение в них эффектов самоорганизации образования макроскопических диссипативных структур. В сферу интересов геофизики попадает все большее число нелинейных энергонасыщенных сред, структурообразование в которых демонстрирует в широком диапазоне параметров и масштабов пространственно-временной скейлинг, характеризующийся сильными, спадающими по степенному закону корреляциями, типичными для критических явлений. Можно предполагать, что физические причины такого характера эволюции связаны с взаимодействием между различными степенями свободы геосистем, которые ведут к нелокальным корреляциям и коллективному поведению. При этом критический режим в процессах самоорганизации оказывается самонастраивающимся и самосогласованным. Относительно недавно исследования явлений такого рода были объединены в рамках термина самоорганизованной критичности.

Одна из важнейших особенностей коллективных явлений — свойство универсальности, т.е. проявлений аналогий и реализация общих принципов динамики, а одно из основных достижений нелинейной динамики XX в. — обнаружение универсальных сценариев переходов от упорядоченного движения к хаотическому при изменении параметров системы. При этом скейлинговый аспект самоорганизации и автомодельность — важнейшая особенность эволюции нелинейных систем в случае сильной коррелируемости поведения их подсистем. Однако, несмотря на впечатляющее разнообразие физических контекстов, в которых проявляется нелинейная динамика конкретных

систем, все еще остается открытым вопрос, насколько эта общая теория и фундаментальные законы самоподобной динамики отвечают и в какой степени могут быть адаптированы к сейсмической реальности.

Как известно, при исследованиях сейсмичности установлены различные законы подобия, реализующиеся в широком диапазоне масштабов. К ним могут быть отнесены закон Гутенберга—Рихтера о скейлинговой зависимости частоты повторяемости от энергетического класса сейсмического события, закон Кнопова—Когана для распределения временных интервалов между событиями, закон Омори для распределения количества афтершоков сильных событий во времени и др. Возможно, по этой причине в геофизической литературе в настоящее время доминирует понимание сейсмического процесса в качестве фундаментального следствия эволюции сейсмоактивной системы к состоянию СОК, а сами эти системы принадлежат к классу систем с СОК [Шаповал, 2011; Захаров, 2014; Гульельми, 2015]. При этом динамика сейсмотектонических систем на разных пространственно-временных масштабах обусловливает согласованное самоподобие сейсмического процесса и современных тектонических движений [Захаров, 2014]. В то же время ситуация в отношении возможности и реализуемости самого прогноза остается весьма неоднозначной [Шаповал, 2011; Наймарк, Захаров, 2012; Захаров, 2014; Гуфельд, 2013а; Гуфельд, Новоселов, 2014].

В геофизической литературе к настоящему времени сложилось весьма неоднозначное отношение к проблеме применимости или приложений СОК к этой проблеме. Отмечаются попытки поисков здесь неких аналогов «здравого смысла». Но в чем он состоит и где этот «смысл»? Полагая, что процесс подготовки землетрясений порождается типичной системой с СОК и, в частности, соответствует закону Гутенберга—Рихтера, высказываются мнения как о невозможности прогноза сейсмических событий [Geller, 1997], так и его принципиальной реализуемости в системах с СОК в реальном времени [Шаповал, 2011]. Ясно, что здесь необходимы новые идеи и подходы. Ввиду нетривиа-

льности проблемы, остановимся на некоторых ее фрагментах несколько подробнее.

О концепции самоорганизованной критичности. Термин «самоорганизованная критичность» введен П. Баком с сотрудниками в 1987 г. [Bak et al., 1987] для объяснения универсального характера возникновения $1/f$-шума (фликкер-шума) в сложных нелинейных динамических системах. Смысл СОК — эволюция таких систем к критическому состоянию без настройки каких-либо параметров. Позднее смысл термина критичность был расширен к более общему значению — критической точке [Aschwanden et al., 2014]. Суть СОК состоит в том, что по мере эволюции нелинейной динамической системы она неизбежно приближается к критической точке (точке бифуркации). Иначе говоря, такие системы могут естественным образом эволюционировать к определенному критическому состоянию, в котором они теряют характерные пространственные и временные масштабы, их корреляционный радиус неограниченно возрастает, а корреляционные функции имеют степенные асимптотики. Существенно, что это критическое состояние практически не зависит от начальных условий и не требуется настройки параметров системы, чтобы достичь его.

Как известно, явление с СОК обычно связывают со степенным характером графика повторяемости, отражающего зависимость числа событий от их линейного масштаба. Индикатор СОК — степенные законы распределения различных временных и пространственных характеристик сейсмичности. Фрактальная структура и фликкер-шум со спектром мощности $1/f$ — пространственные и временные отпечатки СОК.

В более общей формулировке СОК — это устойчивое состояние сложной пространственно-распределенной нелинейной динамической системы, состоящей из множества подсистем, локально взаимодействующих между собой, испытывающей внешнее, вообще говоря, возможно достаточно слабое воздействие, влияющее на некоторую относительно малую часть рассматриваемой системы. Специфика этого состояния — стохастическое возникновение локальных переходных процессов

(неустойчивостей), поддерживающих общую (глобальную) устойчивость этой системы.

Отметим двойственную природу самоорганизованной критичности систем [Aschwanden et al., 2014]. Это СОК-теория или СОК-модель? Двойственная природа СОК систем понимается в том смысле, что они включают как универсальные статистические аспекты, применимые для всех СОК-систем, так и специальные физические механизмы, являющиеся универсальными для отдельных (частных) СОК-явлений. По этой причине в приложениях используется более прагматичное и физически более обоснованное определение СОК-систем: СОК есть критическое состояние нелинейной энергонасыщенной диссипативной системы, которая медленно и непрерывно движется по направлению к критическому значению порога нестабильности, продуцируя внемасштабную, фрактально-диффузионную и перемежающуюся лавинами динамику [Aschwanden et al., 2014].

Кроме того, многие полагают, что СОК — первая общая теория сложных систем. При этом в своем большинстве модели СОК имеют дело с абстрактными сущностями и их построение и исследование может трактоваться скорее как создание языка, нежели как описание реальных систем [Бак, 2014].

Как неотъемлемое проявление СОК трактуется фрактальная динамика активных систем [Иудин, 2005]. При этом отмечается широкое разнообразие физических контекстов, в которых реализуется фрактальная динамика конкретных систем. Фрактальная динамика — это способ моделирования нелинейных систем, обладающих свойством самоподобия. При этом пространственно временной скейлинг характеризуется сильными, спадающими по степенному закону корреляциями, являющимися типичными для критических явлений, а сам критический режим в процессах самоорганизации оказывается самосогласованным и самонастраивающимся.

СОК и фликкер-шум. Как уже упоминалось, одной из основных целей авторов СОК являлось объяснение причины возникновения флуктуаций со спектром типа $1/f^{\beta}$ в сложных неравновесных средах, состоящих из многочисленных взаимодейству-

ющих подсистем, также нелинейных. Переход системы к СОК обычно сопровождается появлением так называемого «розового» шума с показателем β, близким к единице на низких частотах. При этом концепция СОК представляет «розовый» шум следствием достижения сложной системой критического состояния, к которому эта система склонна приходить, а сама генерация «розового» шума оказывается реализуемой только при согласовании количества элементов в системе с длительностью ее эволюции. П. Бак по этому поводу отмечает: «… мы пришли к выводу, что шум $1/f$ должен быть кооперативным феноменом, когда различные элементы большой системы действуют вместе каким-то согласованным образом» [Бак, 2014].

Интересна точка зрения, что $1/f$ шум (фликкер-шум) является неотъемлемой особенностью всех систем, находящихся вдали от равновесия, в то время, как белый обычный шум характерен для равновесных систем. Очевидно, можно предполагать, что фликкер-шум имеет динамическую природу, однако вынуждены констатировать, что адекватных явлению фликкер-шума моделей все еще нет. Большая часть существующих моделей связывает фликкер-шум с термодинамически равновесными флуктуационными процессами [Бочков, Кузовлев, 1983]. Обычно $1/f$-шум достаточно слаб, однако на низких частотах он может оказываться определяющим, превышая на несколько порядков белый, особенно в неоднородных средах.

С учетом известного интегрального соотношения

$$\frac{1}{f}=\frac{2}{\pi}\int\frac{\tau}{1+\left(f^{\tau}\right)^{2}}\frac{d\tau}{\tau}$$

предпринимались попытки его интерпретации как результата существования в системе очень широкого набора времен релаксации τ, суммирующихся с весом τ^{-1}.

С формальной точки зрения описание фликкер-шума оказывается близким к описанию «режима с обострением», характерному для решений многих нелинейных уравнений параболического типа. В этом контексте Ю. Климонтовичем предложе-

на диффузионная теория фликкер-шума [Климонтович, 2002]. При этом оказалось, что фликкер-шум представляет собой некую пространственно-временную когерентную структуру.

Предпринимались попытки решения проблемы фликкер-шума в рамках стохастических процессов, с явлением перемежаемости, представляющего собой непрерывный переход от регулярного движения к хаотическому.

Но всегда ли «розовый» шум является достаточно «розовым»? Согласно работе [Зеленый, Милованов, 2004], явление СОК как сингулярного неравновесного состояния в более широком и общем смысле можно попытаться понять в контексте фундаментальных физических принципов, в частности принципа наименьшего действия, которые регулируют поведение динамических систем в наиболее общем виде. Как известно, принцип наименьшего действия — если в системе происходят некоторые изменения, то количество действия, необходимое для этого изменения, является наименьшим. Это способ получения уравнений движения физической системы с помощью поиска стационарного (часто экстремального, обычно наименьшего) значения специального функционала действия.

В рассматриваемом контексте задача состоит в том, чтобы получить СОК из минимального действия в «пространстве неравновесных (квази) стационарных состояний (НСС): из всего многообразия НСС при бесконечно медленном внешнем вынуждении самоорганизованная динамическая система выбирает то, для которого действие минимально» [Зеленый, Милованов, 2004]. Именно при достаточно медленном вынуждении, получая определенную свободу организации, стремление системы к СОК становится универсальным явлением, не зависящим от специфики системы. Тем самым, по их мнению, может быть установлено соответствие СОК фундаментальным физическим принципам, лежащим в основе современной теории динамических систем (при соответствующих ограничениях по частоте: с увеличением частоты шумы в системе, как правило, темнеют). Тем не менее эффективного критерия обнаружения СОК в текущем режиме на данный момент нет.

Понятно, что понимание сейсмичности как фундаментального следствия эволюции сейсмотектонической системы с аномально медленной динамикой ограничено и нуждается в уточнении. Как известно, кроме СОК, геосистемы демонстрируют и ряд других важных свойств сейсмичности. Это, в частности, сейсмический цикл, форшоковая и афтершоковая активности, закон Омори для афтершоков. Отмечаются различия в законе распределения обычных и сильных сейсмических событий (загиб графика повторяемости вниз для редких сильнейших (характеристических) событий) [Родкин и др., 2014].

Существуют, по меньшей мере, два класса динамических факторов, контролирующих изменение сейсмичности в крупных тектонических структурах. Это — глобальный, медленно меняющийся, контролирующий изменение во времени общего числа сильных событий, и локальный, быстро меняющийся [Фридман и др., 2010]. Современные исследования также свидетельствуют о том, что сами сейсмические события обнаруживают признаки многоуровневых систем со сложной динамикой, включая пространственно-временную локализацию событий, автомодельность, миграцию активности по системам разломов и нарушений в земной коре.

Существенно, что только при медленном вынуждении система получает возможность определенной свободы организации и стремление к СОК становится универсальным явлением [Зеленый, Милованова, 2004]. В этих условиях изучение геосистем (с учетом их принадлежности к СОК) посредством анализа регистрируемых сигналов, генерируемых системой (сейсмических каталогов, например) без априорной информации о системе, без построения модели, описывающей динамику исследуемого ряда (разумеется, не модели «куча песка»), представляет собой практически неразрешимую проблему. И существо дела здесь не в длине каталога, а скорее в присутствии шумов в системе, уровень которых должен быть достаточно малым [Лоскутов, 2010]. Как известно, наличие источников шума в нелинейных динамических системах может индуцировать режимы их функционирования, которые не могут быть реализованы при

отсутствии шума. Яркий пример — стохастический резонанс, при котором отклик нелинейной системы на внешнее воздействие (даже весьма слабое) заметно усиливается с ростом интенсивности шума в системе [Анищенко и др., 2010]. Обратим также внимание на весьма важное обстоятельство: как отличить низкочастотный максимум в спектре пульсаций системы, у которой диссипация компенсируется накачкой, от фликкер-шума? [Руманов, 2013]. Стало очевидным, что именно структура шума может дать принципиально новые возможности диагностики геосистем. Но где же граница между регулярной, но сложной динамикой и хаосом, наблюдаемым в динамических системах, не подверженных влиянию внешних шумов или случайных воздействий? Основной критерий — это устойчивость системы к малым возмущениям [Лоскутов, 2010]. Сложность — зависимость отклика системы на внешнее воздействие может быть весьма различной в зависимости от условий самовозбуждения системы, в том числе и от уровня шумов в ней. Следовательно, роль шумов может оказаться значительно более существенной, чем роль эффектов и процессов, связанных с аномально медленной динамикой. С этой точки зрения сейчас кажется весьма удивительным, что парадигма прогнозируемости систем с СОК, характеризующаяся определенной универсальностью и широкой применимостью, просуществовала столь длительное время. Появилась необходимость развития неких «объединяющих концепций» прогноза динамики геосистем, разработки новых моделей, методов и, что не менее актуально, адекватных образов и понятий, возможно менее изощренных, применимых для неравновесных систем более общего типа.

Сейсмичность и автоволновые процессы. С учетом отмеченной особенности СОК, ограниченной весьма жесткими рамками применимости к системам с аномально медленной динамикой, дальнейшее обобщение состояло в том, чтобы описать сейсмический процесс как один из элементов или видов геотектонических процессов, развивающихся во времени и пространстве, в качестве реализации некоторого нелинейного автоволнового процесса. В свете современной динамической теории

неравновесных нелинейных сред сейсмический процесс — это нестационарная активность геосреды, а в более узком частном контексте — как фундаментальное следствие эволюции геосистемы к состоянию СОК.

Большую роль в такой трактовке сейсмического процесса играет геометрическое представление эволюции геосистемы в малоразмерных проекциях ее фазового пространства. При этом ее поведение может быть описано в терминах аттракторов, устойчивости, бифуркаций, хаоса и т. д., а синхронизация, метастабильность, мультистабильность, синергетический характер поведения в условиях совместного действия полей напряжений, энергетического и флюидного воздействия следует рассматривать в качестве достаточно общего явления.

С этой точки зрения на передний план описания выходят вопросы изучения механизмов пространственно-временной локализации и формирования автоструктур, пространственного саморазвития автоструктур — бифуркаций их статических образов.

В зависимости от энергопотоков из низов литосферы и параметров системы в ней возможны реализация мягкого и жесткого режимов возбуждения автоструктур [Кернер, Осипов, 1989]. Слабый хаос как ключевое условие сохранения литосферы — реализация мягкого режима возбуждения. Реализация жесткого — сейсмическое событие, формирующееся за счет нестационарного внешнего воздействия, превышающего некоторый пороговый уровень. При этом хаос есть фактор обновления сложной организации геосистемы, механизм выхода на одну из возможных тенденций ее развития и способ сохранения целостности, фактор приспособления к изменениям в окружающей среде.

Предполагается, что связующим звеном между топологией автоструктур и их динамикой может являться представление о неравновесном квазистационарном состоянии (фазе с обострением), переход к которому в условиях обмена энергией и веществом реализуется пороговым образом.

Однако в ансамблях структур, состоящих из очень большо-

го числа элементов, обычно значительно расширяется область параметров, где весьма затруднительно или даже невозможно отслеживать пространственные образы, которым в фазовом пространстве соответствует аттрактор. В данной области параметров оказываются наблюдаемыми лишь метастабильные (переходные) образы, которым в фазовом пространстве рассматриваемой модели соответствуют уже не аттракторы, а переходные множества траекторий [Гапонов-Грехов, Рабинович, 1987а,б]. В этом случае задача о бифуркациях системы для теории пространственных образов на основе ее фазового пространства из-за своей сложности оказывается практически неразрешимой. Заметим, что сильная нелинейность также разрушает фазовое пространство системы. С учетом этих обстоятельств можно попытаться дать более адекватное определение сейсмического процесса как результата устойчивой переходной активности геосреды с конечной во времени плотностью потоков энергии и вещества, связанной с переходами пространственных образов как последовательность неравновесных квазистационарных состояний, обусловленных взаимодействием ее подсистем и их ансамблей — постройкой ритмов осциллирующих объектов и подавлением одних колебательных мод другими. Ясно, что стремление геосистем к СОК (критическим режимам), являющегося следствием физического принципа минимальности действия в пространстве неравновесных квазистационарных состояний, только в этом частном случае становится универсальным явлением, не зависящим от специфики системы [Зеленый, Милованов, 2004].

Следовательно, современной сейсмичности соответствует и геосреда, и переходный динамический процесс, обусловленный существованием метастабильных состояний и структурной устойчивостью переходных режимов. В итоге представляется заманчивой идея рассматривать вместо аттракторов, которым соответствуют устойчивые состояния равновесия, теорию переходов пространственных образов (превращений одних образов в другие) — «устойчивые переходные движения вместо аттракторов» [Рабинович, Мюезинолу, 2010]. В этом случае шумы раз-

личной природы, интенсивности и цветности, очевидно, могут проявляться только на определенном, соответствующим их масштабу, иерархическом уровне структурной и термодинамической организации.

Возбудимые среды и автоструктуры. Как уже отмечалось, геосреда — это неравновесная система, относящаяся к классу так называемых возбудимых сред, которые имеют конечный порог неустойчивости. Внешнее воздействие, превышающее пороговый уровень, способно вывести некоторые ее элементы из устойчивого состояния и заставить систему совершать некоторую эволюцию. Если эволюция системы контролируется минимумом производства энтропии, происходит образование динамических структур. Для процессов структурообразования в подобных средах наиболее характерно «саморазвитие» структур в пространстве, сосуществование локализованных возбуждений, мультистабильность, развитие пространственно-неупорядоченных структур, самозарождение устойчивых локализованных образований — автоструктур, превращение одних структур в другие — при изменении параметров среды — бифуркации пространственных образов [Гапонов-Грехов, Рабинович, 1987а,б], наличие пространственных флуктуаций или пространственных шумов, хаотическая динамика ансамблей их подсистем и их синхронизация.

Понятие структуры весьма широкое. Оно лежит в основе современной математики. В реальных системах обычно имеют дело с пространственными или временными структурами. При этом пространственно-временная структура является всеобщим и фундаментальным свойством материи [Эбелинг, 1979].

Напомним в этой связи, что в соответствии с принципом максимальной диссипации [Тараненко и др., 2008], согласно которому структура в системе возникает спонтанно, если система со структурой обладает большей диссипацией, чем система без структур. Под структурой системы обычно понимают способ организации ее элементов и характер связи между ними. Определенный класс пространственно-временных структур в неравновесных средах получил название автоволновых. Автоволны

— одни из важнейших факторов в самоорганизации в термодинамических открытых неравновесных системах, один из видов самоподдерживающихся волн в возбудимых (активных) средах, которые содержат внутренние распределенные источники энергии. Автоструктуры — локализованные пространственные образования, устойчиво существующие в диссипативных неравновесных средах.

Как известно, высокоорганизованные пространственные структуры в средах с диссипацией, далеких от термодинамического равновесия, представляют собой одну из областей физики. При этом наиболее актуальным является исследование формирования и динамики автоструктур [Рабинович, Сущик 1990; Турунтаев и др., 2012]. Автоструктуры — весьма нетривиальный объект. Выделяют динамические, локализованные, статические, стационарные, уединенные автоструктуры. Независимость (в некоторых пределах) от конечных изменений граничных и начальных условий — главное свойство автоструктур, что оказывается возможным лишь в средах с диссипацией. Существенно, что в реальных физических экспериментах обычно наблюдаются не индивидуальные автоструктуры, а их ансамбли — ансамбли связанных автоструктур [Рабинович, Сущик 1990; Гапонов-Грехов, Рабинович, 1987а,б].

Исследование динамики пространственных ансамблей автоструктур сопряжено обычно с постановкой новых нетривиальных задач, в частности задачи о пространственных бифуркациях, развивающихся на фоне изменения параметров системы, а в пространстве — вдоль энергомассопотока, является весьма сложной задачей. Она гораздо сложнее задач теории бифуркаций динамических систем: если на основании классической теории бифуркаций в динамической системе в принципе можно предсказать все возможные ее движения на основании элементов ее фазового пространства, то для теории переходов пространственных образов такая постановка задачи выглядит нереальной [Гапонов-Грехов, Рабинович, 1987а,б]. В этом случае аналитические возможности исследования автоструктур и динамики их ансамблей, как уже отмечалось, оказываются

ограниченными рамками некоторых модельных уравнений, что весьма экзотично. Численное же их исследование весьма затруднено и требует чрезвычайно много времени.

Таким образом, изучение механизмов пространственно-временной локализации и формирования автоструктур, их пространственного саморазвития — бифуркаций статических образов в зависимости от параметров энергопотока и уровня шумов в системе, остается весьма актуальной задачей. Можно предполагать, что связующим звеном между топологией автоструктур (и, вероятно, топологией межблочной системы) и ее динамикой является представление о неравновесном квазистационарном состоянии геосистемы (фазе с обострением), переход к которому осуществляется при некотором условии (или пороге) обмена энергией и веществом с внешней средой — за счет многомасштабных корреляций в пространстве и времени. При этом пространственные корреляции обнаруживают себя в характеристиках (параметрах) автоструктур, которые, в свою очередь, отражаются в структуре и динамике спонтанного излучения, регистрируемого в геосреде. Заметим в этой связи, что диссипация может осуществляться за счет генерации автоструктурой излучений различной физической природы. При этом проблема перестройки пространственных излучений в среде — это проблема, связанная с бифуркациями в пространственных ансамблях автоструктур, превращений одних пространственных образований в другие.

Но как экспериментально можно обнаружить и диагностировать эти пространственные образы и получить представление в динамике превращений одних пространственных образований в другие?

Ответ почти очевиден, если вспомнить, что спонтанная эмиссия — и сейсмическая, и электромагнитная, является отражением собственной эволюции геосистемы, а его спектр отражает стадию этой эволюции [Шуман, 2014б,г; 2015]. Природа спонтанной эмиссии — трансформация собственной энергии геосреды в различные локально неустойчивые состояния, которые и становятся ее источниками при различных внешних энерге-

тических воздействиях. Весьма существенно, что спонтанные эмиссии, в отличие от вынужденных излучений, не зависят от этих внешних вынуждающих воздействий, а определяются только свойствами геосистемы. При этом, разумеется, следует предусмотреть возможность различного физического содержания процессов генерации спонтанных эмиссий, и сейсмоакустической, и электромагнитной, на разных уровнях геометрически самоподобной блоковой системы.

Как известно, к настоящему времени лучше всего изучены процессы в возбудимых (активных) средах, где их элементы и подсистемы связаны между собой диффузионным способом. Подобные среды описываются параболическими нелинейными уравнениями типа «реакция—диффузия» вида

$$\frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t} = D\Delta^2 \mathbf{W} + \mathbf{F}(\mathbf{W}),$$

где **W** — вектор состояния элементарного объема возбудимой среды, D — матрица (коэффициент) диффузии, **F(W)** — нелинейная векторная функция, интегрально задающая интенсивность соответствующих преобразований, в частности механизмов механоэлектромагнитных преобразований. При этом специфические возбудимые свойства геосреды определяются формой нелинейной функции **F(W)** [Давыдов и др., 1991].

В последние годы спонтанному сейсмоэлектромагнитному шуму (спонтанной эмиссии) придается самостоятельное значение [Хаякава, Коровкин, 2011; Шуман 2014б,г; 2015], а на передний план выходят задачи синтеза теории переходов пространственных образов и сейсмоэлектромагнетизма. Это связано с тем, что переход к неравновесному квазистационарному состоянию геосистемы, реализуемом при некотором пороге обмена энергией и веществом с окружающей средой, обнаруживает себя в характеристиках автоструктур, которые, в свою очередь, отражаются в структуре и динамике спонтанных эмиссий литосферного происхождения. Как уже отмечалось, эти эмиссии обладают упорядоченной структурой и динамикой геосреды, в частности связаны с геометрией ее межблочной структуры. Ве-

сьма примечательно, что спонтанные эмиссии, которые можно назвать геометрическим шумом литосферы, так же могут быть истолкованы в терминах автоколебаний.

Автоструктуры и спонтанные эмиссии литосферы. Как уже упоминалось, эволюция процессов и объектов в литосфере не может рассматриваться вне рамок автоволновых пространственно-временных структур. Установлено, что геосистемы способны формировать различные пространственно-временные структуры активности, представляющие собой импульсы и фронты возбуждения, неустойчивость которых ведет к установлению в них самоподдерживающихся колебаний с определенной пространственной конфигурацией. При этом каждый из элементов или подсистем генерирует последовательность импульсов возбуждения с различной пространственной частотой. Автоколебания взаимодействуют между собой, формируя в неоднородной геосреде более устойчивую и геометрически простую конфигурацию со стоячими волнами [Васильев и др., 1979].

Автоволновые структуры возникают в системах, неравновесность которых определяется величиной энергомассопотоков, а их тип — характерными пространственно-временными масштабами этих потоков. Реализуется «мягкий» или «жесткий» режим возбуждения автоструктур [Кернер, Осипов, 1989], причем разрывные (релаксационные) автоколебания с частичным сбросом энергии в процессе своей эволюции в виде электромагнитной и сейсмической спонтанной эмиссии активно способствуют изменению их естественного фона, регистрируемого в геосреде и на ее поверхности. В более широком контексте спонтанные эмиссии могут быть истолкованы как некоторый суммарный, интегральный эффект проявления движений различного рода в земной коре и всей литосфере, особенностей их строения, напряженно-деформированного состояния и процессов разрушения на различных масштабных уровнях — от локальных очаговых областей до глобальных сейсмоэлектромагнитогенерирующих структур. Это — результат устойчивой переходной активности геосреды, способов релаксации накопленных напряжений и многочисленных физических механиз-

мов их генерации, определенных, в конечном счете, плотностью потоков энергии и вещества из низов литосферы и их пространственно-временными параметрами. При этом рождение диссипативных структур (автоструктур) носит пороговый характер: новая структура всегда является результатом неустойчивости системы и возникает из флуктуаций, причем спонтанные эмиссии — их чувствительный и надежный индикатор.

К настоящему времени накоплены достаточно обширные экспериментальные и теоретические свидетельства реальности существования спонтанной эмиссии литосферного происхождения [Гульельми, 2007; Чеботарева, 2011; Шуман и др., 2012]. Однако трудности ее описания и интерпретации, очевидно по причине онтологической сложности этого объекта исследований, все еще остаются весьма значительными [Шуман, 2012б].

В рассматриваемом контексте принципиально важное значение имеет известная флуктуационно-диссипативная теорема физики, смысл которой состоит в том, что механизм любой диссипации является одновременно и механизмом рождения флуктуаций [Кадомцев, 1994]. В итоге по причине того, что просачивание флюидов и легких газов из верхней мантии носит, как принято считать, диффузионную природу, можно предположить о возможности реализации условий для возникновения спонтанных эмиссий (геометрического шума).

Но каковы конкретные физические механизмы, превращающие геосистемы в распределенный генератор спонтанных эмиссий, в частности сейсмоэлектромагнитных? Как известно, их не так мало. Не претендуя на анализ или даже на перечисление их совокупности (более детальные сведения приведены в работах [Сурков, 2000; Гульельми, 2007; Чеботарева, 2011; Шуман, 2012б]), укажем на некоторые из них.

В частности, один из возможных механизмов основан на фрактальной модели сейсмогенеза — самосогласованной перколяционной модели распределенной сейсмичности, обусловленной и связанной с перколяционной неустойчивостью дегазирующего субстрата литосферы [Иудин, 2005]. Примечательно, что именно процессы дегазации и соответственно механизм

перколяционной неустойчивости насыщенной флюидами и легкими газами литосферы превращают ее в распределенный сейсмический генератор. С процессами дегазации, с пространственно-временными потоками энергии и вещества из низов литосферы (верхней мантии) могут быть связаны и механизмы генерации электромагнитной эмиссии. В этом случае в качестве базового механизма генерации очевидно может быть принято переходное фрактальное рассеивание волны (возмущения) диэлектрической проницаемости (появление которой также обусловлено процессами дегазации) на зарядах, сгустках зарядов или диполей, содержащихся в геосреде или возникающих в ней в течение этих процессов. При этом любое переходное излучение можно рассматривать как следствие процесса трансформации возмущения проницаемости с образованием электромагнитных, а в принципе, и других типов волн [Гинзбург, Цытович, 1984].

Разумеется, для низкочастотных возмущений диэлектрической проницаемости рассеивание возможно только в том случае, если их частота лежит в окне прозрачности геосреды. Но, во-первых, восходящие флюидные и газовые потоки сопряжены с образованиями фрактальных агрегатов в таких системах, что резко увеличивает мощность генерируемого в них излучения и возможности его выхода из земных недр на дневную поверхность. Во-вторых, наличие в среде магнитного поля земного ядра также меняет существо дела: в этом случае возможно формирование и распространение спиральных (геликоидальных) волн (или автоволн), весьма слабозатухающих низкочастотных колебаний. При этом, разумеется, следует учитывать возможность различного физического содержания процессов генерации спонтанных излучений различной природы на разных пространственно-временных масштабах. С этой точки зрения как-то противопоставлять или разграничивать спонтанные сейсмические (сейсмоакустические) и электромагнитные шумы литосферного происхождения как универсального свойства геосреды далеко не очевидно и не всегда целесообразно.

О формировании очагов. Ввиду исключительной сложности динамики геосистем и происходящих в них процессов до насто-

ящего времени вопрос о фундаментальных основах физики и механики формирования очагов сейсмических процессов остается открытым [Пантелеев и др., 2012; Гуфельд, 2007; Гульельми, 2015]. Остаются нерешенными ключевые вопросы физики и механики разрушения и сейсмических явлений в земной коре. Отсутствует адекватная реологическая модель геодинамических процессов в мантии и литосфере, рассматриваемой в качестве холодного пограничного слоя, сформированного мантийной конвекцией [Биргер, 2012].

Очевидно, сегодня превалируют две качественные модели подготовки сейсмических событий. Это, дилатансная, в основу которой положена зависимость объемных деформаций касательных воздействий и лавинно-устойчивого трещинообразования, процессы в которой связываются с особенностями взаимодействующих между собой трещин. Получили признание подходы, в соответствии с которыми развитие процесса очага может быть представлено в рамках эволюции неравновесных динамических систем с характерным типом критических явлений — структурно-скейлинговыми переходами, самоорганизованной критичностью и закономерностями пространственно-временного скейлинга при реализации сейсмических событий [Наймарк, 2008].

Предложена физико-химическая модель сейсмичности, в основе которой лежит представление о реакции блочной геосреды на взаимодействие с восходящими потоками легких газов [Гуфельд, 2007]. Однако, хотя современное понимание процессов и структуры геосреды, несомненно, дает основание для оптимизма, отмечается [Гуфельд, 2013а] и некая безысходность в представлении о сейсмическом процессе. В этом контексте с учетом многообразия модельных геофизических систем представляется привлекательной идея построения некой, хотя бы и достаточно грубой феноменологической модели сейсмичности. Однако на протяжении длительного времени эта идея не находила широкого признания, поскольку построенные на ее основе примеры носили весьма абстрактный характер и, вообще говоря, было неясно, имеют ли подобные представления какое-либо

отношение к реальности. И лишь в последние годы ситуация начала меняться. Предприняты попытки связать формирование очаговой зоны землетрясения с процессами, снижающими скорость диссипации энергии в некоторой локальной области геосреды, а следовательно, и скорости роста энтропии [Шаповал, Шнирман, 2011]. Это — процесс в некоторой области открытой неравновесной и самоорганизованной системы, удовлетворяющий принципу минимального производства энтропии. При этом зарождение локальных областей (состояний с низкой энтропией) в конечном счете ведет к ускорению общего роста энтропии всей системы в целом. В этом случае, если эволюция системы контролируется минимумом производства энтропии (неравновесные условия), происходит самоорганизация диссипативных структур. Как известно, термин «диссипативная структура» подчеркивает термодинамический аспект проблемы: они появляются и существуют в термодинамически открытых системах за счет диссипативных процессов утилизации энергии и энтропии [Васильев и др., 1979, с. 652].

Часто под диссипативными структурами понимается комплекс явлений самоорганизации в неравновесных средах. Очевидна в принципиальном плане способность к самоорганизации в диссипативных средах, которые описываются нелинейным уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha T^l + \frac{\partial}{\partial r}\left(\beta T^m \frac{\partial}{\partial r} T\right),$$

где α, β, l, m — некоторые константы, T — температура, была теоретически установлена еще в 1977 г. [Самарский и др., 1977]. Среди предсказанных эффектов отметим следующие:

– образование метастабильной локализации тепла в некоторой локальной области среды, размер (фундаментальная длина) которой

$$L \approx \sqrt{\frac{\beta T^m}{\alpha T^l}} = \sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}\ T^{\frac{m-l}{2}};$$

– в случае возникновения нескольких таких областей метастабильной локализации они взаимодействуют между собой.

Существенно, что предпочтение, отдаваемое критическим режимам функционирования, обусловлено их относительным термодинамическим предпочтением — свободная энергия ансамблей ее подсистем понижается при формировании пороговых конструкций. При этом неравновесное критическое состояние системы (фазы с обострением), переход к которому осуществляется пороговым образом (некоторый порог обмена энергией и веществом с окружающей средой), реализуются за счет многомасштабных корреляций в пространстве и времени. В случае резонанса система минимально излучает и максимально запасает энергию. При резком снижении скорости диссипации поступающей в эту область геосистемы энергии оказывается неизбежным ее выброс.

Примечательно, что при таком подходе, который может быть назван термодинамическим, не имеет принципиального значения природа источника напряжений в земной коре. Далее, весьма важно, что эволюция процессов и объектов в литосфере не может осуществляться вне рамок автоволновых процессов, являющихся пространственно-временными структурами. Сами сейсмические события, а также их форшоки и афтершоки связаны с трансформацией автоволновых структур в диссипативные структуры обострения, требуют для своего существования постоянного притока энергии и вещества. При этом формирование очаговой зоны определяется как уровнем и скоростью изменений пронизывающих систему энергопотоков, так и топологией дефектов на каждом пространственном масштабе. В итоге формирование очага оказывается тесно связанным с автоструктурой большой амплитуды (жесткий режим возбуждения), в то время как слабый хаос (спонтанный фон излучений различной природы — геометрический шум литосферы) может интерпретироваться в качестве реализации мягкого режима возбуждения. Возникает естественная задача изучения механизмов пространственно-временной локализации и формирование автоструктур, их пространственного саморазвития в зависимости от параметров энергопотока и уровня шумов в системе.

Весьма заманчиво, что при таком подходе, как уже отмеча-

лось, можно попытаться уклониться от сложных вопросов природы напряжений и механики разрушения, в частности отклика геосреды с дефектами на внешнюю нагрузку, а получаемые результаты моделирования процесса формирования очага вмонтировать в эту достаточно грубую схему.

Некоторые замечания и комментарии. Очевидно, современные методы моделирования и прогноза сейсмичности в своем большинстве опираются на концепцию самоорганизованной критичности как одну из парадигм современной нелинейной физики и, в принципе, находятся в русле идей и методов теории динамических систем, задекларированных еще в 70—80-х годах прошлого века. Это позволило по-новому взглянуть на новые геофизические факты, представления и процессы. В частности, с учетом экспериментально обнаруженных степенных распределений и автомодельных свойств сейсмичности принято считать, что процесс подготовки сейсмических событий порождается типичной системой с СОК. Как неотъемлемое проявление СОК интерпретируется фрактальная динамика активных геосистем [Иудин, 2005]. По данным обширных каталогов землетрясений определена фрактальная природа сейсмичности различных сейсмоактивных зон [Захаров, 2014]. Принято считать, что фрактальные структуры и $1/f$-шум (фликкер-шум) — соответственно, пространственные и временные срезы самоорганизации [Бак, 2014].

Исследованы теоретические аспекты и особенности прогнозируемости в ряде математических моделей с СОК, демонстрирующих основные, грубые свойства сейсмичности. Однако из-за сложности проблемы прогнозируемости систем с СОК она исследовалась, в основном, эмпирически [Шаповал, 2011]. Несмотря на понимание связи СОК с аномально медленной динамикой систем, это все еще в значительной степени эмпирическая концепция без должного теоретического обоснования. До настоящего времени нет эффективного критерия СОК геосистемы в текущем режиме, нет и общей теории, охватывающей широкий спектр расходимостей типа $1/f^{\beta}$. К тому же экспериментально установлены и существенные различия в законах

распределения обычных и сильных сейсмических событий [Родкин и др., 2014]. Стало очевидным, что задача прогноза, особенно краткосрочного, значительно сложнее, чем это предполагалось еще совсем недавно, и выходит за рамки устоявшихся представлений. Уже в своей постановке она нуждается в коррекции. В частности, понимание сейсмического процесса в качестве фундаментального следствия эволюции геосистемы к состоянию СОК ограничено рамками динамики систем с аномально медленной динамикой [Зеленый, Милованов, 2004]. При этом «стационарность модельной системы имеет место лишь на чрезвычайно длинных временных интервалах, соответствующих десятилетиям эволюции сейсмического процесса» [Шаповал, 2011].

Примечательно, что в центре исследований современной сейсмологии оказались высокоорганизованные пространственные структуры в диссипативных средах, далеких от термодинамического равновесия. Стала очевидной потребность смены классической парадигмы СОК на новую. В частности, это может быть парадигма переходов (бифуркаций) пространственных образов в неоднородной активной (возбудимой) геосреде, которые находят отражение в структуре и динамике спонтанных эмиссий.

С позиций современной нелинейной динамики можно попытаться дать иную феноменологическую трактовку сейсмического процесса. В частности, он может быть истолкован как результат устойчивой переходной активности энергонасыщенной геосистемы с конечной во времени плотностью потоков энергии и вещества. Это последовательность неравновесных квазистационарных состояний (ННС) геосистем, переходы к которым реализуются посредством механизмов бифуркаций и хаоса. В определенном смысле сейсмический процесс — это метастабильные состояния геосреды и последовательность таких состояний. При этом переход к ННС реализуется при некотором пороге обмена энергией и веществом с окружающей средой и определяется уровнем шумов в системе путем многомасштабных корреляций в пространстве и времени. В этом кон-

тексте одной из важнейших задач является исследование влияния шумов различной интенсивности и цветности на динамику пространственных ансамблей автоструктур и превращений одних пространственных образов в другие.

Существенно, что пространственные корреляции обнаруживают себя в пространственных структурных характеристиках автоструктур и, соответственно, спонтанных излучений — сейсмических, сейсмоакустических, электромагнитных. Механическая сторона этой проблемы — рассмотрение деформируемой геосреды как нелинейной многоуровневой системы, которое позволяет определить механизмы формирования локальных зон сильнонеравновесных состояний, в которых зарождаются деформационные дефекты различного масштабного уровня [Макаров, 2012]. С этой точки зрения землетрясение ассоциируется с автоструктурой большой амплитуды, трансформирующейся в диссипативную структуру с обострением пороговым образом (жесткий режим возбуждения), фоновая сейсмичность — с трансформациями автоструктур малой амплитуды (слабый хаос, мягкий режим возбуждения). Слабость хаоса — ключевое условие существования литосферы. Но в ансамблях структур, состоящих из большого числа элементов, пространственные образы, которым в фазовом пространстве отвечает аттрактор, фактически не наблюдаемы. Оказываются наблюдаемыми лишь переходные метастабильные образы, которым в фазовом пространстве модели отвечают уже не аттракторы, а переходные множества траекторий [Гапонов-Грехов, Рабинович, 1987а,б].

Напомним в этой связи, что геометрический образ метастабильного состояния в фазовом пространстве модели — это седло, а переходу из одного метастабильного состояния в другой соответствует неустойчивая сепаратриса седла [Рабинович, Мюезинолу, 2010]. Но, так как время, проводимое системой в окрестности седлового равновесия, обратно пропорционально логарифму уровня шумов, характерное время переходного процесса может быть весьма большим и меняться в широких пределах. Связь между топологией автоструктур и их динамикой реализуется посредством представлений о неравновесных

квазистационарных состояниях геосистемы, одним из важных свойств которых является стремление к СОК, обусловленное ее (геосистемы) термодинамикой.

Заключение. Какие выводы можно сделать, исходя из современного состояния исследований по вопросам прогнозируемости сейсмического процесса и его реализации в отношении конкретных сейсмических событий? Очевидно, в сжатой форме с привлечением некоторых идей и методов теории активных динамических систем наиболее значимые из них, по мнению автора, могут быть сформулированы в следующем виде.

1. Показано теоретически и экспериментально установлен факт весьма быстрых изменений параметров геосистем и сред с активными внутренними источниками энергии. Это, вообще говоря, выводит их за рамки систем с аномально медленной динамикой, когда стремление к СОК становится универсальным явлением, не зависящим от их специфики, и определенно требует развития более обоснованного инструментария исследований, более адекватных образов и понятий, типичных для систем более общей природы.

2. Очевидно, для будущих экспериментальных работ в этой области наиболее приемлемыми являются исследования процессов формирования автоструктур, их превращений при изменении параметров геосистем, их хаотической динамики («структурной турбулентности») и их отражении в пространственно-временной мозаике полей спонтанных эмиссий, генерируемых в литосфере.

3. Имеются весомые аргументы в необходимости смены парадигмы СОК и понимания сейсмичности как фундаментального следствия эволюции сейсмотектонических систем с аномально медленной динамикой на новую — парадигму переходов пространственных образов в неоднородной активной (возбудимой) геосреде и интерпретации сейсмичности в качестве реализации некоторого нелинейного автоволнового процесса.

4. Наличие источников шума в нелинейных динамических геосистемах может индуцировать режимы их функционирования, которые не могут быть реализованы в его отсутствие.

5. Среди приоритетных исследований, позволяющих приблизить ситуацию к экспериментальной, можно назвать:

– изучение процессов и механизмов пространственно-временной локализации и формирования пространственных ансамблей автоструктур, в частности их пространственного развития и трансформации в диссипативные структуры с обострением;
– исследование хаотической синхронизации как естественного развития теории динамического хаоса, изучения пространственного хаоса и его роли в формировании пространственных ансамблей структур, взаимоотношений пространственного и временного хаоса и его связи с динамикой геосистем;
– синтез идей нелинейной динамики и сеймоэлектромагнетизма, изучение пространственно-временной структуры и динамики спонтанных эмиссий, их статических портретов и распространяющихся фронтов синхронизации, роста автокорреляции и вариабельности;
– теоретический и экспериментальный анализ механизмов реализации процессов деформирования и способов релаксации накапливаемых напряжений.

Несомненно, эти задачи весьма сложны, многогранны и в значительной степени междисциплинарны. Однако проблемы, связанные с их решением в свете современных теоретических и экспериментальных наработок и новых технических и технологических возможностей, отнюдь не кажутся безнадежными, но, очевидно, требуют разработки некоторой глобальной программы, глобального проекта динамической сейсмологии и сейсмоэлектромагнетизма. И такая программа кажется вполне реальной и выполнимой в обозримом будущем.

Спонтанная эмиссионная активность литосферы и сейсмоэлектромагнитные явления

Геофизический журнал,
№ 2, Т. 38, 2016, С. 79—87.

Введение. Как известно, литосфера — уникальная естественная лаборатория, в которой самой природой реализован эксперимент по генерации и самоорганизации весьма разнообразных сейсмических, сейсмоакустических и электромагнитных процессов и явлений, зарегистрированных на земной поверхности. В частности, литосфера генерирует сейсмические колебания в весьма широком диапазоне частот — от сотен герц до 10^{-4} Гц. Наблюдается большое разнообразие электромагнитных возмущений литосферного происхождения, на которые накладываются поля внеземных источников также в исключительно широком диапазоне частот — от 10^{-4} до 10^{6} Гц и выше. Обзор весьма обширных теоретических и экспериментальных исследований по данной проблематике можно найти в известных монографиях и статьях [Сурков, 2000; Гульельми, 2007; Хаякава, Коровкин, 2011; Surkov, Hayakava, 2014 и др.].

Стало очевидным, что в широком смысле вопрос о природе сейсмоэлектромагнитных эмиссий литосферного проис-

хождения является фундаментальным и не существует универсальной модели, пригодной для описания всех типов эмиссий, генерируемых геосредой. Безосновательно также противопоставлять или разграничивать сейсмические, сейсмоакустические и электромагнитные эмиссии литосферы. Их следует рассматривать в качестве единого комплекса возмущений, генерируемых геосистемой [Шуман, 2015а,б]. Существенно, что данное эмиссионное излучение является отражением собственной эволюции геосреды, а его спектр отражает стадию этой эволюции и характеризует меру энергонасыщенности системы. Однако с учетом чрезвычайной обширности темы обычно концентрируют внимание на более узком, утилитарном понимании сейсмоэлектромагнетизма — исследовании электромагнитных явлений, связанных с сейсмической активностью, в частности преобразования энергии движений горных пород в энергию электромагнитных возмущений [Гульельми, 2007]. При этом эмиссия может быть вызванной или спонтанной. Вызванная электромагнитная эмиссия —отклик литосферы на сейсмические возмущения в непосредственной окрестности пункта наблюдений. Спонтанная — вне прямой видимой связи с проявлением сейсмической активности [Левшенко, 1995]. И если пути и методы изучения вынужденных сигналов литосферного происхождения в целом достаточно ясны и разработаны [Гульельми, 2007], механизмы генерации спонтанных весьма схематичны и исследовались, в основном, на качественном уровне [Левшенко, 1995; Шуман, 2012б; 2015а,б]. Наиболее интересным и надежным для наблюдений сейсмоэлектромагнитных сигналов считались ультрачастотный (УНЧ) (до 3 Гц) и крайне низкочастотный (КНЧ) (3—30 Гц) диапазоны электромагнитных возмущений, хотя электромагнитные сигналы этого диапазона весьма активно генерируются также и в атмосфере, ионосфере, магнитосфере и космическом пространстве. Весьма полный обзор современных исследований по проблемам УНЧ и КНЧ возмущений содержится в монографии [Surkov, Hayakava, 2014].

Теоретические исследования различных электромагнитных эффектов, возникающих при разрушении и деформации твер-

дых тел в естественных и лабораторных условиях, обобщены в монографии [Сурков, 2000]. В частности, развиты теоретические представления, объясняющие появление электромагнитного шума данного диапазона при разрушении проводящего вещества, находящегося во внешнем магнитном поле. Развита теория электрокинетического эффекта в пористых водонасыщенных породах с фрактальной структурой порового пространства за порогом перколяции.

Новый аспект рассматриваемой проблемы — изучение сейсмоэлектромагнитных явлений в связи с попытками развития методов краткосрочного прогноза сейсмических событий. Наряду с исследованием электромагнитной эмиссии литосферы они включают также изучение атмосферных возмущений сейсмического происхождения, ионосферных возмущений, связанных с субионосферным распространением УНЧ-волн [Хаякава, Коровкин, 2012]. На передний план исследований здесь выдвигаются механизмы связки литосфера—атмосфера—ионосфера, причем подчеркивается, что эти сейсмоэлектромагнитные явления, вообще говоря, имеют несейсмическую природу и поэтому не имеют ничего общего с сейсмологией. И хотя появление сейсмоэлектромагнитных явлений, вообще говоря, связано с механическими процессами в литосфере, акценты смещаются в сторону изучения атмосферного электричества, физики и химии атмосферы, физики плазмы и верхних слоев атмосферы, процессов в ионосфере, а сейсмология остается лишь основным поставщиком информации о литосфере. Иначе говоря, в качестве основной цели исследований сейсмоэлектромагнитных явлений эти авторы видят изучение механизма литосферно-атмосферно-ионосферных связей, что, несомненно, сужает сферу их применения и понимания.

Заметим в этой связи, что помимо появления новой экспериментальной техники и полученных на ее основе обширных данных полевых наблюдений, существенно изменялась и сама нелинейная динамика, фокус интересов которой в значительной степени сосредоточился на исследовании сложных систем. В частности, к их описанию в последнее время оказались вов-

леченными ее методы описания процессов в сильнонеоднородных и неравновесных скрытых системах, пронизываемых потоками энергии и вещества. Получили развитие исследования динамики нелинейных энергонасыщенных геосистем и распределенных сред, структурообразование в которых демонстрирует в широком диапазоне параметров и масштабов пространственно-временной скейлинг, характеризующийся сильными степенными корреляциями, типичными для критических явлений. Традиционно большую роль в таком описании играет геометрическое представление эволюции исследуемых систем в малоразмерных проекциях их фазового пространства. В этом случае поведение системы описывается в терминах аттракторов, переходных состояний, устойчивости, бифуркаций, динамического хаоса и др. Однако описание поведения диссипативных открытых систем в фазовом пространстве модели оказывается эффективным, когда плотности всех потоков, пронизывающих эти системы, сбалансированы и близки к стационарным, а связи между их подсистемами симметричны [Рабинович, Мюезинолу, 2010]. Именно в этом случае фазовое пространство систем разбивается на области (бассейны) притяжения разных аттракторов. Но эти предположения применительно к реальным геосистемам часто оказываются не реалистичными, что, разумеется, существенно ограничивает возможности моделирования переходных процессов и состояний.

В центре интересов нелинейной динамики оказывались исследования по синтезу фрактальности и топологии в описании динамики перколирующих систем, описание которых не укладывается в рамки традиционных подходов [Зеленый, Милованов, 2004; Иудин, 2005; Рабинович, Мюезинолу, 2010]. Очевидно, при описании таких систем также необходимы новые под.-ходы и идеи. Некоторым аспектам приложения идей нелинейной динамики неравновесных (активных) сред к описанию генерации и распространения спонтанных эмиссий литосферы автор и посвятил дальнейшее изложение, продолжая таким образом начатые ранее исследования [Шуман, 2015а,б].

Геосистемы, спонтанные шумы и флуктуации. Существует тенденция рассматривать вариации геофизических полей как проявление режима детерминированного хаоса во фрактальной геосреде [Лукк и др., 1996], который является индикатором ее динамического состояния. Установлено, что хаос в геосистемах может порождаться различными, возможно универсальными путями, независимо от природы геосистем [Лоскутов, 2010]. В частности, найдено, что случайность в рассматриваемом случае может быть обусловлена как внутренними свойствами геосистем, так и внешними факторами. Разработаны методы анализа временных рядов наблюдений, которые позволяют отличить стохастическое поведение системы от детерминированного хаоса. При этом основной критерий отличия между регулярной, но сложной динамикой и хаосом — это устойчивость системы к малым возмущениям [Лоскутов, 2010]. Ясно также, что наличие лишь временного ряда (вместо полного решения) сильно ограничивает наши возможности анализа систем. Кроме того, хаос в динамической системе должен оставаться слабым. Слабость хаоса — ключевое условие существования литосферы. Очевидно, при этом одним из самых сложных вопросов остается вопрос о природе хаотичности в геосистемах и ее следствиях, причем стохастичность часто понимается в качестве синонима термина случайность. Но стохастическими величинами являются только те из них, для которых определена вероятность. На практике при обработке экспериментальных данных обычно рассматриваются и определяются вероятностные характеристики как стационарное распределение вероятности по аттрактору, корреляционные функции, спектры мощности и др.

Как известно, шум (стохастический процесс) обычно классифицируют по следующим категориям:

- по типу независимой переменной; это либо пространственный шум, представляемый функцией векторного аргумента, либо временной в виде функции скалярной переменной;
- по виду спектральной плотности мощности;
- по виду корреляционной функции распределения (белый, фликкер-шум, гауссовый шум, экспоненциальный и др.);

– по степени изменчивости его ведущих характеристик (стационарный, нестационарный, эргодический процесс);
– по типу математической модели шума.

Разумеется, шум в реальной геосистеме, вообще говоря, не является белым, его статистика в большинстве случаев неизвестна.

Можно предположить, что спонтанный (релаксационно-диссипативный) шум литосферы может быть истолкован в качестве реализации некоторого нелинейного автоволнового процесса, развивающегося во времени и пространстве, причем структура его спектра определятся масштабами, ограничивающими диапазон проявления фрактальных свойств, и значением спектральной размерности геосреды [Кадомцев, 1995], которой, как известно, присущи различные фрактальные структуры. В частности, флуктационно-диссипативная теорема связывает, как уже упоминалось, флуктуации в системах (их спектральную плотность) с ее диссипативными свойствами.

На практике обычно рассматривают быстрые флуктуации (белый шум) и низкочастотные, ассоциируемые с «цветными» шумами, чьи спектры мощности $P(f)$ соответствуют степенной функции. Различают обычно розовый или фликкер-шум ($P(f) \sim f^{-1}$), коричневый ($P(f) \sim f^{-2}$) и черный шум ($P(f) \sim f^{-3}$). Полагают, что цвет шума на низких частотах может рассматриваться в качестве индикатора близости системы к состоянию самоорганизованной критичности (СОК) или степени ее близости к «предельности»: преобладание розовых оттенков указывает на стабилизацию системы в предельном неравновесном стационарном состоянии (НСС), соответствующем СОК [Зеленый, Милованов, 2004]. Иначе говоря, чем ближе система к НСС, тем светлее шум на низких частотах. С ростом частоты шумы в системах обычно темнеют, что обычно связывают с влиянием их структурных свойств на распределение энергии по частоте. В частности, дальнедействующие корреляционные эффекты вносят, по терминологии [Зеленый, Милованов, 2004], дополнительные «мрачноватые» оттенки в коричневый шум.

Подобно темно-коричневому черный шум также является структурным. Можно говорить, что розовый шум на низких частотах связан со стремлением динамических возбуждений системы к СОК, в то время как темно-коричневый в области промежуточных частот обусловлен фрактальными возбуждениями или флуктуациями. В этом контексте розовый шум может навязываться динамическим, в то время как темно-коричневый — структурным [Зеленый, Милованов, 2004].

Таким образом, можно сделать вывод, что детальное изучение цветности шумов в геосистемах может значительно расширить представления о динамических процессах, протекающих в них. В итоге одна из актуальных задач — исследование критических аттракторов, типичных для систем, параметры которых близки к критическим, т. е. к точке бифуркации стационарного режима их функционирования. Заметим, однако, что на практике обычно имеют дело с мультифрактальными процессами генерации шумов, допускающими разложение на интервалы с различными значениями скейлинга (параметра β в степенном спектре мощности ($P(f) \sim f^{-\beta}$), являющимся достаточно общим явлением. Дополнительные трудности связаны с тем, что мы имеем дело не только с временным, но и пространственным хаосом и, соответственно, в отличие от странно-аттракторной теории, в принципе, необходим учет воздействия шумов на крупномасштабную динамику системы.

В заключение раздела обратим внимание на важную особенность функционирования активной системы в условиях стационарного режима и в условиях близости ее параметров к точке бифуркации. В этом случае, как известно, при приближении функционирования системы к этой точке отмечается быстрый рост восприимчивости, в основном, за счет вклада низкочастотных (мягких) мод [Руманов, 2013], причем нарастание мягких мод около бифуркации стационарного режима является универсальным явлением. В спектре пульсаций формируется низкочастотный пик, однако, в отличие от фликкер-шума, этот пик исчезает при удалении параметров системы от критических явлений. Примечательно, что вдали от точки бифуркации

наблюдается, в основном, белый шум, а вблизи формируется максимум (резонанс на нулевой частоте). Слабый шум, присущий всякой реальной системе, усиливается. Появляются дополнительные возможности диагностики момента приближения бифуркаций стационарного режима функционирования сейсмогенерирующей системы по нарастанию низкочастотных (мягких) мод в спектре ее шумов [Руманов, 2013]. Очевидно, в итоге мы оказываемся с гораздо более широкими возможностями диагностики и прогноза функционирования геосистем даже в случае выполнения локальных измерений.

О диффузионно-релаксационной компоненте литосферного шума. Очевидно, не существует единой модели генерации спонтанной сейсмоэлектромагнитной эмиссии литосферы. Трудности ее истолкования связаны с тем обстоятельством, что спонтанной эмиссии соответствует и геосреда, и переходные динамические процессы в ней.

В частности, рассматривая геосреду как нелинейную диссипативную динамическую систему, обладающую свойством СОК, сейсмоэлектромагнитная эмиссия может интерпретироваться как фундаментальное следствие эволюции геосистемы к состоянию СОК и как динамический отклик таких систем на пронизывающие их потоки энергии и вещества из низов литосферы. Но в соответствии с флуктационно-диссипативной теоремой физики механизм любой диссипации является одновременно и механизмом рождения флуктуаций [Кадомцев, 1994]. При этом флуктуации никогда не исчезают, а поддерживаются на уровне, который диктуется дискретностью геосистем.

Однако, как известно, самоорганизация не является универсальным свойством геосистем. В то же время наличие пространственно-временной структуры является их всеобщим и фундаментальным свойством, и, соответственно, при описании механизмов генерации спонтанных эмиссий геосреды в ряде случаев можно попытаться уклониться от фундаментальных и дискуссионных вопросов СОК: это СОК-теория или СОК-модель? В более расширенной трактовке спонтанная эмиссия (сейсмоэлектромагнитный шум литосферы естественного про-

исхождения) — это продукт устойчивой переходной активности геосреды как открытой неравновесной диссипативной системы с конечной во времени плотностью энергетических ресурсов и энергомассопотоков, пронизывающих систему.

Очевидно, что это универсальный эффект, не требующий специфических условий для своего образования: достаточно располагать источником энергии, чтобы самовозбуждение колебаний в соответствии с флуктуационно-диссипативной теоремой стало возможным. Эти энергопотоки, в частности, и просачивание флюидов из низов литосферы имеют диффузионную природу и поэтому реализуются условия для возникновения спонтанного шума. Разумеется, существуют и возмущения, генерируемые внешним окружением. В результате оказывается возможным и реализуемым весьма широкий перечень физических механизмов и физического содержания процессов их генерации самоподобной структурой геосреды, определяемых уровнем и скоростью энергомассопереноса из низов литосферы на соответствующих пространственно-временных масштабах. При этом и сейсмоакустическая, и электромагнитная эмиссии обладают ярко выраженными свойствами нелинейных процессов, способностью к периодической самоорганизации и хаотизации. Примечательно, что аккумуляция и передача больших объемов энергии вещества через литосферу сопровождаются генерацией взаимодействующих сейсмических, сейсмоакустических, гидродинамических, электромагнитных и других типов возмущений и волн, распространяющихся как в литосфере, так и в атмосфере вплоть до ионосферы.

Заметим, что спонтанные эмиссии как упорядоченные пространственно-временные структуры, определяемые свойствами самой геосистемы, могут быть истолкованы в терминах автоколебаний, в большинстве случаев релаксационного типа. С этой точки зрения исследования высокоорганизованных пространственных (диссипативных) структур геосреды, в частности автоструктур, выходят на передний план современной геодинамики.

Напомним, что диссипативные структуры — это упорядоченные самоорганизующиеся образования в системах, далеких

от термодинамического равновесия, обладающие определенной формой и характерными пространственно-временными размерами, устойчивые относительно малых возмущений. Их важнейшие характеристики — область локализации, время жизни и фрактальная размеренность. Для своего существования диссипативные структуры требуют постоянного притока энергии извне, так как их самоорганизация, по определению, связана непосредственно с обменом энергией и веществом с окружающей средой. Однако, кроме автоколебательных, для сред рассматриваемого типа характерны также интерференционные, триггерные, резонансные явления. По этой причине, ввиду сложности проблемы, отнюдь не случайно, что на данном этапе исследований не удается отразить имеющуюся весьма обширную эмпирику на одинаково разделяемой всеми аксиоматике. Однако ключ к пониманию сути явлений процессов генерации спонтанных эмиссий — активная роль геосреды и особых ее динамических состояний, порождаемых кооперативным поведением ее подсистем, ее диссипативность и нелинейность.

Как известно, существует несколько подходов к описанию спонтанных эмиссий, среди которых отметим перколяционный, динамический и релаксационный механизмы. Первый из упомянутых связан с перколяционной моделью диффузионного фронта: просачивание флюидов, очевидно, имеет диффузионную природу, и поэтому реализуются условия для возникновения фрактального геометрического шума. Заметим, что проявление свойств перколяционного типа весьма вероятно для сред с низкой проницаемостью и в трещиноватых породах [Гийон и др., 1991]. Достаточно лишь располагать источником энергии, чтобы самовозбуждение колебаний стало возможным. Другой, динамический, акцентирует внимание в процессах генерации эмиссий на активной роли самой геосреды и особых ее динамических состояний, порождаемых кооперативным поведением ее элементов и подсистем. В этом случае спонтанный шум рассматривается как динамический отклик геосреды (активной системы с диффузией) на внешние или внутренние энерговоздействия, как результат спонтанного образования автоструктур и

реализации их мягкого или жесткого режима возбуждения, и последующей эволюции с частичным сбросом энергии в виде сейсмоакустической или электромагнитной эмиссии. Релаксационный подход ассоциируется с формированием неоднородных ансамблей автоструктур, возникающих в диссипативной геосреде при достаточно большой степени ее неравновесности. Становится возможным формирование различных, в том числе и хаотических, пространственно-временных структур активности, представляющие собой импульсы и фронты возбуждений, неустойчивость которых ведет к установлению в геосистеме самоподдерживающихся колебаний с определенной пространственной конфигурацией. При этом каждый элемент геосреды генерирует последовательность импульсов возбуждений с различным интервалом следования и характерным распределением энергии по частоте, а колебательная неустойчивость в неоднородной геосреде ведет к образованию стоячих волн, отражающих наиболее устойчивую и геометрически простую конфигурацию. При этом формируется пространственно-временная структура спонтанных эмиссий, которая является отображением вещественно-энергетической структуры элементов и объектов геосреды на земной поверхности, в определенном смысле «изоморфная» их структуре и динамике.

Весьма вероятно, что в основу рассматриваемой парадигмы процессов генерации спонтанных эмиссий литосферы может быть положена метастабильность и принципы динамики, в частности метастабильные состояния и переходные динамические процессы, связанные с взаимодействием различных элементов и подсистем геосреды как динамической системы с учетом ее строения, иерархически разломно-блоковой структуры, напряженно-деформированного состояния и процессов разрушения на разных масштабных уровнях — от локальных очагов до региональных и глобальных сейсмоэлектромагнитогенерирующих структур, их синхронизацией (координацией) и энергообменом. Следует предусмотреть также возможность различного физического содержания процессов генерации на разных уровнях геометрически самоподобной блоковой системы гео-

среды, в частности генерации связанных акустоэлектромагнитных возбуждений. При этом один из возможных механизмов сейсмической активности может быть ассоциирован с перколяционной неустойчивостью дегазирующего субстрата литосферы [Иудин, 2005], а в качестве базового механизма процессов трансформации механической энергии в энергию электромагнитную может быть принято, во-первых, переходное фрактальное рассеивание волны проницаемости, связанной с фронтами неустойчивости, на зарядах, сгустках зарядов или диполей, содержащихся в геосреде, или, во-вторых, изменения во времени параметров такой системы. Существенно, что образование фрактальных агрегатов в таких системах резко увеличивает мощность создаваемого излучения.

Таким образом, теория протекания и фрактальные методы дают конструктивную основу для анализа важнейших аспектов динамики геосистем и новые возможности трактовки сейсмоэлектромагнитных явлений. Важно то, что здесь мы имеем дело с новым классом процессов и явлений, которые сегодня востребованы и используются для создания новых технологий и методов зондирующих и мониторинговых систем [Чеботарева, 2011; Шуман и др., 2012; Шуман, 2014в,г, 2015а,б].

Но почему спонтанную эмиссиию (спонтанный шум) литосферы иногда называют «геометрической»? Где здесь геометрия и не является ли он «шумом без геометрии»? Можно думать, что нет. Ранее уже отмечалась важная роль в процессах генерации спонтанных эмиссий фронтов критичности, в частности перколяционно диффузионного фронта и связанных с ним переходных процессов в неоднородной нестационарной геосреде, называемых переходным рассеиванием [Гинзбург, Цытович, 1984]. Очевидно, геометрия здесь состоит в присоединении к фронту и отсоединении от него целых кластеров (связанных объемов, занятых диффузирующим агентом) с широким диапазоном размеров в той части фронта, где концентрация этого агента равна поровой концентрации протекания. И этот эффект является универсальным [Зосимов, Лямшев, 1995, с. 391].

Заключение. До настоящего времени остается весьма противоречивой проблема генерации и распределения спонтанных эмиссий, и сейсмической, и сейсмоакустической, и электромагнитной. К их описанию в настоящее время оказываются вовлеченными методы нелинейной динамики, в частности процессы в сильнонеравновесных открытых системах, пронизываемые потоками энергии и вещества. Активно исследуются нелинейные энергонасыщенные распределенные среды, структурообразование в которых демонстрирует в широком диапазоне параметров и масштабов пространственно-временной скейлинг, характеризующийся сильными степенными корреляциями, типичными для критических явлений. Большую роль в таком описании традиционно играет геометрическое представление эволюции исследуемых геосистем в малоразмерных проекциях фазового пространства. В этом случае поведение системы описывается в терминах аттракторов, переходных состояний, устойчивости, бифуркаций, динамического хаоса и др. При этом существенно изменялась и сама нелинейная динамика. В центре ее интересов оказались исследования сложных систем, вопросы синтеза фрактальности и топологии в описании динамики перколирующих систем, описание которых не укладывается в рамки традиционных подходов [Зеленый, Милованов, 2004: Иудин, 2005; Рабинович, Мюезинолу, 2010].

Как известно [Рабинович, Мюезинолу, 2010], описание поведения диссипативных открытых систем в фазовом пространстве модели оказывается эффективным, когда плотности всех потоков, пронизывающих эти системы, сбалансированы и стационарны, а связи между их подсистемами близки к асимметричным. Именно в этом случае фазовое пространство системы разбивается на области притяжения разных аттракторов. Однако эти предположения применительно к реальным геосистемам в ряде случаев оказываются нереалистичными, что, вообще говоря, сильно ограничивает возможности моделирования переходных процессов и состояний. Трудности усугубляются тем обстоятельством, что спонтанные эмиссии — это не только временной, но и пространственный хаос в сложных распределен-

ных активных геосистемах. Но, как известно, общей теории активных систем не существует, а каждый разработанный пример активной среды демонстрирует примеры новых типов ее динамики или самоорганизации. Очевидно, на этом фоне прогресс в исследовании спонтанных эмиссий весьма ограничивается отсутствием достаточно перспективных идей, в то время как привычные представления настолько устоялись, что даже соглашаясь с некоторой новой аргументацией, мы часто снова к ним возвращаемся, как только сталкиваемся с необычным явлением или вопросом.

Новый аспект проблемы — истолкование спонтанной эмиссии в качестве устойчивой переходной активности геосреды с конечной во времени плотностью принизывающих ее энергомассопотоков, динамика которых определяется глобальными процессами энергетики, дегазации и динамики Земли. Это — отражение переходных динамических состояний и процессов в геосреде, связанных с функционально определяемым взаимодействием ее различных подсистем, их синхронизацией и хаотизацией во времени, превращением одних в другие при изменении ее параметров. В известном смысле — это отражение динамического и пространственно-временного хаоса в реальной геосреде, ее метастабильных состояний и последовательности таких состояний, реализуемых при некотором пороге обмена энергией и веществом с окружающей средой. С этой точки зрения ключевые динамические объекты, подлежащие первоочередному рассмотрению — это метастабильные состояния и устойчивые переходы.

Следовательно, в рассматриваемом контексте фоновая флуктационно-диссипативная сейсмоэлектромагнитная активность литосферы или ее релаксационный шум — это продукт и отражение трансформации автоструктур или ансамблей автоструктур малой амплитуды (мягкий режим возбуждения, слабый хаос, причем слабость хаоса — ключевое условие существования литосферы). С этой точки зрения фундаментальным принципом, который может быть положен в основу моделирования спонтанных эмиссий литосферы как открытой неравно-

весной активной системы является динамический анализ ее метастабильных состояний и последовательности таких состояний, определяемых взаимодействием ее подсистем. Фактически это означает формирование нового направления в исследовании генерации и распространения спонтанной эмиссии литосферы и диагностики ее состояния.

Не существует магических формул для выбора переменных, параметров отношений, описывающих поведение системы, ограничений, а также критериев эффективности модели.

Р. Шеннон

Дробная динамика и эмиссионная активность геосистем

Геофизический журнал, № 3, Т. 38, 2016, С. 72—83 .

Введение. Как известно, современные геофизики все чаще сталкиваются с необходимостью применения существенно нелинейных моделей для объяснения и трактовки широкого спектра природных явлений и процессов. Важный объект геофизических исследований в области нелинейной динамики — процессы в сильнонеравновесных открытых системах. В последние годы получен ряд фундаментальных результатов о динамике геосистем, получили адекватную интерпретацию многие виды их активности, включая сейсмический процесс и спонтанную электромагнитную эмиссию, в терминах теории динамических систем. Как результат обобщений многолетних экспериментальных исследований физических свойств горных пород в их широком петрофизическом и фациальном составе и обобщенного представления о физических системах с распределенным запасом энергии и способных формировать регуляр-

ные во времени и пространстве структуры, произошел перелом в понимании свойств самой геосреды как открытой активной диссипативной нелинейной динамической системы с изменяющимися параметрами. Ее основные свойства — диссипативность динамики, компенсация энергопотерь за счет действия внешних и внутренних источников, активность ее элементов и подсистем, в частности блоков с самоподобной иерархией, многомасштабность происходящих процессов, что относится к базовым идеям нелинейной динамики. Активно формируется новое направление исследований ее динамики в рамках теории возбудимых (активных) сред с делокализованными и распределенными источниками энергии. И хотя общей теории активных сред не существует, а каждый достаточно разработанный пример активной среды демонстрирует новые типы ее динамики, имеется относительно успешный опыт моделирования таких систем с целью понимания их поведения, по меньшей мере в грубом приближении «в целом». Как известно, он опирается на геометрическое представление эволюции исследуемой системы в малоразмерных проекциях ее фазового пространства. Именно в этом случае поведение системы может быть описано в терминах аттракторов, переходных состояний, бифуркаций, хаоса, устойчивости и др. [Рабинович, Мюезинолу, 2010]. При этом фазовое пространство динамической системы разбивается на области притяжения разных аттракторов, если плотности всех потоков энергии и вещества, пронизывающих систему, сбалансированы и стационарны, а связи между ее отдельными плементами или подсистемами близки к симметричным. Существенно, что формальная динамика активных систем как неотъемлемое проявление самоорганизованной критичности обнаруживается в геосистемах практически повсеместно, а эволюция процессов и объектов в литосфере Земли не может осуществляться вне рамок автоволновых процессов, являющихся пространственно-временными структурами. Заметим, что под самоорганизацией в неравновесных средах обычно понимают спонтанное образование и последующую эволюцию этих структур.

Примечательно, что в принципиальном плане способность к самоорганизации в диссипативных средах, описываемых нелинейным уравнением теплопроводности, была теоретически установлена еще в 1977 г. [Самарский и др., 1977]. И хотя эти исследования уже имеют свою историю, многие актуальные проблемы описания геосистем все еще остаются открытыми. Изучение их сложной пространственно-временной динамики — одна из наиболее актуальных проблем современной геофизической науки, тесно связанной с другими фундаментальными проблемами, к примеру образования диссипативных структур. Заметим также, что автоструктуры как локализованные пространственные образования, устойчиво существующие в диссипативных неравновесных средах, весьма сложный и нетривиальный объект исследований: в экспериментах обычно наблюдаются не отдельные автоструктуры, а ансамбли таких структур [Гапонов-Грехов, Рабинович, 1987б]. Задачи формирования автоструктур, их превращений при изменении параметров геосреды («бифуркации» их пространственных образов) много сложнее обычных задач теории бифуркаций динамических систем [Гапонов-Грехов, Рабинович, 1987б].

Можно предположить, что в качестве связующего звена между топологией автоструктур и ее динамикой может служить представление о неравновесном квазистационарном состоянии геосистемы, переход к которому реализуется пороговым образом за счет взаимодействия с внешней средой, путем обмена энергией и веществом [Рабинович, Мюезинолу, 2010]. При этом неравновесное состояние, время существования которого достаточно продолжительно, называют метастабильным состоянием. Оно соответствует одному из минимумов термодинамического состояния системы при заданных внешних условиях.

Напомним в этой связи, что самоорганизованная критичность (СОК) — это, в определенном смысле, сингулярное неравновесное квазистационарное состояние, которое может быть достигнуто лишь при достаточно медленном вынуждающем воздействии на систему [Зеленый, Милованов, 2004]. Именно в этом случае стремление системы к СОК становится универсаль-

ным. С этой точки зрения геодинамика, очевидно, может рассматриваться в качестве следствия самоорганизации в ходе эволюции Земли, а в более узком, утилитарном и прикладном значении, — как раздел теории динамических систем, пронизываемых потоками энергии и вещества.

Как известно, при изучении свойств таких систем широко используется подход, основанный на анализе спонтанных сигналов, генерируемых самими системами или вынужденных, производимых системами в качестве отклика, реакции на внешнее воздействие. Важно, что процессы генерации этих сигналов, а также их характеристики оказываются тесно связанными со структурой и динамикой исследуемой системы [Кадомцев, 1994; Фрадков, 2005].

В рассматриваемом контексте представляется естественной постановка и рассмотрение как общей проблемы изучения механизмов генерации и распространения эмиссионного излучения литосферы, так и конкретизация ее частных аспектов. Как ни странно, но в многочисленных публикациях хотя и подчеркивалась ключевая роль нелинейных свойств и особенностей геосистем в этих процессах, аппарат современной нелинейной динамики, как правило, использовался недостаточно. Цель настоящей статьи — привлечь внимание к этой быстро развивающейся области геофизических исследований. Существенно, что здесь мы имеем дело с новым классом процессов и явлений, которые сегодня востребованы и используются при создании новых технологий и методов зондирующих и мониторинговых систем [Чеботарева, 2011; Шуман и др., 2012; Шуман, 2014б, 2015в, 2016б].

О нелинейно-динамическом подходе к изучению геосистем. Как уже отмечалось, подход, основанный на идеях и методах нелинейной динамики, является одним из наиболее важных, эффективных и приоритетных направлений исследований современной геофизической науки, а динамические модели геосистем, построенные на их основе с учетом обширных экспериментальных данных, открыли широкие возможности для понимания и в ряде случаев предсказания динамических меха-

низмов функционирования геосреды, ее отдельных элементов и подсистем. Одна из основных задач нелинейно-динамического подхода — выработка на основе экспериментальных данных адекватных динамических образов ключевых явлений и процессов, происходящих в геосистемах, построение на их основе базовых моделей и исследование динамики этих моделей [Кадомцев, 1994; Фрадков, 2005; Некоркин, 2008]. Такие понятия, как регулярные и хаотические аттракторы, область (бассейн) притяжения, устойчивость, бифуркации стали обычными и прочно вошли в обиход исследований, связанных с изучением геосистем и их динамики. Основной элемент такого подхода, ставшего уже классическим, — исследование и поэтапное прослеживание фазового портрета геосистемы и его перестройки при непрерывном изменении ее параметров вдоль некоторой кривой в пространстве этих параметров. Заметим, что бифуркации — это смена топологической структуры разбиения фазового пространства динамической системы. В этом контексте факторы, вызывающие перестройку фазового портрета геосистемы, очевидно в таком рассмотрении имеют принципиальное значение.

Акцентируя внимание на таких характерных свойствах геосреды, как диссипативность ее динамики, компенсации ее энергопотерь за счет действия внешних и внутренних источников, активности ее отдельных элементов и подсистем, способных генерировать различные типы возмущений, обычно выделяют следующие этапы изучения геосистем, соответствующие общим принципам и подходам нелинейной динамики [Некоркин, 2008]:

– исследование структурно-устойчивых систем и явлений, не изменяющих их свойств при малых вариациях параметров;
– анализ структуры фазового пространства (пространства состояний) системы с целью диагностики возможных типов ее поведения;
– исследование тенденций развития и эволюции процессов при изменении параметров геосреды, в частности обнаружение бифуркаций.

Важнейшую роль в таком описании играет геометрическое представление эволюции геосистемы в малоразмерных проекциях ее фазового пространства. Именно в этом случае поведение системы эффективно описывается в терминах аттракторов, бифуркаций, хаоса и др. Однако развитие нелинейно-динамического подхода при исследовании реальных геосистем наталкивается на значительные трудности, связанные с их необычностью и сложностью, в частности с наличием большого числа переменных и параметров, отсутствием достаточно обоснованных моделей, полученных на основе базовых уравнений физики, отсутствием понимания архитектуры геосистем, нелокальностью связей между их подсистемами и др. Имеются факторы, разрушающие фазовое пространство системы, в частности сильная нелинейность — физическая, геометрическая, структурная. Остаются неразработанными проблемы многоуровневой самоорганизации и учета нелинейности иерархически организованных систем [Панин и др., 2012].

Трудности усугубляются тем обстоятельством, что аттракторы, бифуркации, странные аттракторы, имеющие дробную размерность Хаусдорфа—Безиковича, другие особенности пространства состояний системы, в том числе и более сложные в случае многомерного пространства, такие как «седло-фокус», сепаратрисные инвариантные многообразия и другие весьма экзотичные объекты фазового пространства, которые характеризуют возможные типы поведения геосистем, на практике обычно непосредственно не наблюдаются [Руманов, 2013].

Очевидно, для описания таких систем необходимы новые идеи и подходы, а нетрадиционность задач динамической теории нелинейных неравновесных сред, по мнению [Гапонов-Грехов, Рабинович, 1987б], связана в первую очередь с явлениями структурообразования и пространственного саморазвития этих структур. Новые подходы концентрируют внимание на анализе нестационарных переходных динамических процессов, определяемых взаимодействием различных подсистем геосреды, ее метастабильных состояний и последовательности таких состояний [Рабинович, Мюезинолу, 2010]. При этом рассматри-

ваемые пространственно-временные структуры самоорганизации, в частности и автоструктуры, согласно Е. Князевой [Князева, 2000], — это «…метастабильно устойчивые локализованные процессы в открытых нелинейных средах, способных постоянно перестраиваться, вступать в кооперативные взаимодействия с другими процессами и образовывать тем самым более крупные целостности или же, напротив, распадаться на более мелкие структуры…».

Можно предположить, что метастабильность и устойчивые переходы — ключевые динамические объекты при моделировании процессов в геосреде. Новое направление исследований крупномасштабных природных систем связано с развитием базовых представлений фрактальной динамики активных распределенных систем как неотъемлемого проявления самоорганизованной критичности, позиционирующей скейлинговый аспект самоорганизации [Иудин, 2005].

Некоторые определения. Характерные свойства геосистем — диссипативность динамики, компенсация потерь за счет действия внешних источников, способность генерировать разнообразные типы колебаний — от единичных импульсов до хаотических [Некоркин, 2008]. В частности, такие системы способны генерировать различные пространственно-временные структуры активности — импульсы и фронты возбуждения, неустойчивость которых ведет к установлению в такой системе самоподдерживающихся колебаний с определенной геометрией, причем каждый из ее элементов или подсистем генерирует последовательность импульсов возбуждения с различным интервалом следования. При изучении свойств таких систем широко используется метод, основанный на анализе спонтанных, генерируемых самой системой возмущений.

Как известно, аккумуляция и передача больших объемов энергии и вещества через литосферу сопровождается генерацией взаимодействующих сейсмических, сейсмоакустических, электромагнитных, гидродинамических и других типов возмущений и волн, распространяющихся как в литосфере, так и в атмосфере вплоть до ионосферы. Важное связующее звено, ко-

торое позволяет с единых позиций подойти к объяснению процессов генерации спонтанных эмиссий — дегазация [Гуфельд, 2007].

Не ограничивая общности изложения, сосредоточим далее внимание на некоторых классических определениях сейсмичности и сейсмического процесса и их возможных обобщениях, опираясь на кажущееся вполне естественным предположение, что все сейсмогенерирующие системы со временем неуклонно стремятся перейти в такие состояния, которые описываются аттракторами. Традиционно [Касахара, 1985 и др.] сейсмический процесс определялся в качестве совокупности сейсмических событий, рассматриваемых как точки в пространственно-временных координатах, снабженные энергетическим параметром или индексом. Само понимание сейсмического процесса ассоциировалось с фундаментальным следствием эволюции сейсмотектонической системы к состоянию СОК, причем динамика таких систем на разных пространственно-временных масштабах порождает согласованное самоподобие сейсмического процесса и современных тектонических движений [Захаров, 2014].

Опираясь на известные аналогии [Монин, Берестов, 2005], можно сформулировать в рамках такой модели более адекватное определение сейсмичности, более удобное как с точки зрения его понимания, так и попыток его численного моделирования. В более общей форме, очевидно, сейсмичность можно определить как распределение вероятностей сейсмической активности на фазовом пространстве сейсмотектонической системы или, в менее лаконичной форме, как статистический ансамбль состояний, проходимых такой геосистемой за некоторый достаточно длительный интервал времени наблюдений. При этом, разумеется, необходимо учитывать, что литосфера как открытая динамическая система не является самодостаточной: ее мгновенное состояние не определяет ее эволюцию в будущем. Такие системы, как уже отмечалось, находясь в метастабильном состоянии, весьма чувствительны к внешним слабым воздействиям и флуктуациям. Да и с феноменологической

точки зрения такая модель сейсмичности не является в достаточной степени полной. Имеется ряд факторов, разрушающих фазовое пространство или деформирующих его, в частности достаточно быстрые вариации плотности энергомассопотоков, пронизывающих систему, несимметричность связей между ее подсистемами, сильная нелинейность. В то же время наличие пространственно-временной структуры в таких системах является их всеобщим и фундаментальным свойством [Эбелинг, 1979]. С учетом их важной и, возможно, определяющей роли, возникает новый аспект проблемы — попытки трактовки спонтанных эмиссий в качестве отражения и результата устойчивой переходной активности геосреды как открытой нелинейной неравновесной системы, динамика которой определяется глобальными процессами энергетики, дегазации и динамики Земли [Шуман, 2015в, 2016б].

Наша ближайшая задача — рассмотреть некоторые, возможно нестандартные и дискуссионные идеи и подходы, отражающие современные тенденции ее трактовки. Очевидно, в более широком контексте спонтанная эмиссионная активность литосферы может рассматриваться в качестве проявления фрактальной динамики активной геосреды, итога взаимодействия и компромисса между механизмами ее самоорганизации, определяющими общие тенденции эволюционных процессов, и эффектами динамической релаксации, отражающими роль флуктационно-диссипативных факторов. При этом под диффузионными обычно понимают процессы перераспределения вещества и энергии в геосреде путем диссипации или их направленного переноса под действием термодинамического потенциала, а в простейшем случае — градиента концентрации, механизма перколяционной неустойчивости, насыщенного флюидами ее порового субстрата. В этом контексте спонтанная активность литосферы — это отражение трансформации автоструктур или ансамблей автоструктур. При этом связующим звеном между топологией автоструктур и их динамикой очевидно являются представления о неравновесном квазистационарном состоянии геосистемы, формировании и пространственном развитии ав-

тоструктур (переходах пространственных образов). В определенном смысле это — связность в пространстве внутренних степеней свободы геосистем, управляющая их пространственно-временной эволюцией в процессе внутренних и внешних энерговоздействий, отражение динамики их метастабильных состояний и последовательности таких состояний.

Рассмотрев общие принципы генерации спонтанных эмиссий литосферного происхождения, сосредоточим далее внимание на физических механизмах генерации и попытках их аналитического описания.

Механизмы генерации. К настоящему времени существует несколько подходов к описанию спонтанных эмиссий, генерируемых в литосфере. Существует весьма широкий спектр различных физических механизмов и физического контекста их генерации и распространения [Сурков, 2000; Гульельми, 2007; Шуман, 2016б]. При этом не исключается возможность различного физического содержания процессов их генерации на разных уровнях или масштабах геометрически самоподобной активной геосреды. Не существует универсальной модели самой геосреды, одинаково пригодной для описания процессов генерации всех наблюдаемых типов возмущений, волн и излучений. По этой причине до настоящего времени не удается отразить имеющуюся эмпирику и теоретические представления на одинаково применяемой и разделяемой всеми аксиоматике [Шуман, 2016б]. Очевидно, по этой причине прогресс в исследовании спонтанных эмиссий литосферного происхождения все еще ограничивается рамками весьма упрощенных моделей геосреды и, возможно, дефицитом достаточно конструктивных идей. Видны и трудности решения проблемы: общей теории активных сред, как известно, не существует. Один из перечисленных подходов, базирующийся на фрактальной динамике активных систем, обычно связывают с перколяционной моделью диффузионного фронта: просачивание флюидов из низов литосферы имеет диффузионную природу и в соответствии с флуктационно-диссипативной теоремой реализуются условия для возникновения фрактального геометрического шума [Зосимов, Лямшев, 1995].

Заметим, что проявление свойств перколяционного типа весьма вероятно и даже характерно для трещиноватых сред или сред с низкой проницаемостью [Гийон и др., 1991]. Как известно, критический уровень пористости ведет к появлению зон (или «окон») прозрачности — макроскопических зон геометрической связности порового пространства — кластеров диффундирующей флюидной компоненты. Реализуется механизм генерации, обусловленный неустойчивостью многофазной среды по отношению к перколяционному кластеру [Иудин, 2005].

Другой, динамический, акцентирует внимание в процессах генерации на активную роль геосреды и особых ее динамических состояний, порождаемых кооперативным поведением ее элементов и подсистем и с учетом ее нелинейных свойств. В итоге подсистема оказывается способной формировать различные пространственно-временные структуры активности, представляющие собой импульсы и фронты возбуждений, неустойчивость которых ведет к формированию в ней самоподдерживающихся колебаний с определенной пространственной конфигурацией. Эти фронты возбуждений и являются наиболее энергетически активными и значимыми источниками эмиссий.

Релаксационный подход обычно ассоциируется с формированием неоднородных ансамблей автоструктур, возникающих в диссипативной геосреде при достаточно большой степени ее неравновесности. При этом в зависимости от параметров геосистемы и пронизывающих ее энергомассопотоков в ней может реализовываться мягкий или жесткий режим возбуждения автоструктур [Кернер, Осипов, 1989]. В первом случае образуются автоструктуры малой амплитуды, а во втором — большой. Источником спонтанных эмиссий в этом случае выступают релаксационные (разрывные) автоколебания с частичным сбросом энергии в виде взаимодействующих, сейсмических, сейсмоакустических, гидродинамических, электромагнитных и других типов возмущений и волн.

Важно, что в качестве одного из основных механизмов генерации спонтанных эмиссий может служить переходное фрактальное рассеяние фронтов различной природы, возникающих

в процессе эволюции автоволновых структур. В частности, это — автоволновые фронты в возбудимых средах, фронты переупаковки горных пород, которые могут быть описаны моделью перколяции в градиенте концентрации диффундирующего агента, когда концентрация становится критической, образуя кластеры разных размеров и связанные с ними фронты диэлектрической проницаемости (фронты диссипативного всплеска диэлектрической проницаемости). В этом случае в качестве базового механизма генерации может быть рассмотрено переходное фрактальное рассеяние фронта диэлектрической проницаемости на зарядах, сгустках зарядов или диполей, содержащихся в геосреде или возникающих в ней в течение этих процессов. При этом любое переходное излучение можно рассматривать как следствие процесса трансформации возмущения проницаемости с образованием электромагнитных, а в принципе, и других типов волн [Гинзбург, Цытович, 1984].

Достаточно сложный вид этого всплеска может быть обусловлен также особенностями формирования локальных зон сильнонеравновесных состояний, в которых зарождаются деформационные дефекты различного масштабного уровня в деформируемой системе (земной коре) как нелинейной многомасштабной иерархической системе [Панин и др., 2012].

Заметим также, что распространяющийся фрактальный фронт этого всплеска проницаемости является, вообще говоря, недифференцируемым и не имеет нормали.

Уравнение генерации. С развитием нелинейной динамики оказалось, что проблема генерации спонтанных эмиссий является значительно более сложной и выходит за рамки классической теории. Как уже отмечалось, сейсмоэлектромагнитная активность — это непрерывный по времени переходный процесс в активной (возбудимой) геосреде, называемый переходным рассеянием, а идеология теории протекания и фрактальные модели дают конструктивную основу для анализа ее важнейших аспектов генерации, в частности формирования широкодиапазонного фрактального спектра излучений. Трудности, однако, состоят в отсутствии общей теории активных сред, хотя их об-

ширный класс может быть описан системой нелинейных уравнений типа «реакция—диффузия» [Васильев и др., 1979; Кернер, Осипов, 1989; Фрадков, 2005; Давыдов и др., 1991].

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \hat{D}\,\Delta \mathbf{u} + \mathbf{F}(\mathbf{u}), \qquad (1)$$

где **u** — вектор состояния элементарного объема возбудимой среды, $\hat{D}$ — матрица (коэффициент) диффузии, **F**(**u**) — нелинейная функция.

Нелинейные уравнения этого типа или их системы, как известно, обычно имеют более чем один тип решений. Это удлиненные бегущие импульсы, периодические волновые последовательности и стационарные пространственно-неоднородные структуры — автоструктуры. Иначе говоря, в рассматриваемом классе систем реализуются два типа нелинейных процессов — спонтанное образование автоструктур, их эволюция, а также спонтанное образование автоволн и стационарных уединенных собственных состояний (автосостояний) систем. Их параметры — форма, амплитуда, скорость распространения — полностью определяются параметрами системы и не зависят от вида возмущения, вызывающего их образование [Кернер, Осипов, 1989], причем в зависимости от параметров системы в ней может реализовываться мягкий или жесткий режим возбуждения автоструктур.

С учетом фундаментального характера рассматриваемых уравнений диффузионного типа, имеющегося опыта моделирования сейсмомагнитных волн [Гульельми, 2007], а также того обстоятельства, что спонтанные эмиссии — это упорядоченные структуры, локализованные в пространстве и определяемые свойствами самой исследуемой геосистемы, в работах [Шуман, 2012б, 2015в] предпринята попытка выписать линейное уравнение генерации спонтанной электромагнитной эмиссии в следующей достаточно общей форме:

$$\frac{\partial B_i}{\partial t} = \gamma_{ij}\,\Delta_r B_j + F_i(\mathbf{B}), \qquad (2)$$

где B_i — компонента индукции, $\gamma_{ij}=c^2/4\pi\sigma_{ij}$ — матрица диффузии, $F_i(\mathbf{B})$ — нелинейная функция, определяемая динамичностью процессов в геосреде, разнообразием и эффективностью механизмов механоэлектромагнитных преобразований.

Обзор возможных путей и методов решения, а также анализ некоторых особенностей этой системы приведен в работе [Цифра, Шуман, 2010]. С целью упрощения анализа системы предлагается использовать ее симметрию. Этот метод позволяет свести рассматриваемую систему в частных производных параболического типа к изучению системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Для этого может быть использован как классический теоретико-групповой подход, так и его обобщение — метод условной инвариантности. Тем не менее это довольно сложная математическая модель и достаточно полное ее исследование весьма затруднительно.

Дробное уравнение генерации и фрактонные возбуждения. Важный аспект проблемы генерации — учет фрактальной структуры геосреды. Специфика проблемы — зависимость макроскопических параметров геосреды от рассматриваемого объема, что делает невозможным применение стандартной модели сплошной среды, в которой они определяются однозначно для физически бесконечно малых объемов. И хотя фрактальные свойства, казалось бы, и не относятся к основным параметрам объектов геосреды или процессов в ней, наличие фрактальной структуры в ряде случае принципиально меняет их свойства. Суть дела — фрактальные системы, как правило, обладают более высокими удельными мощностями излучения эмиссий и необычной дробно-степенной зависимостью интенсивности излучений с разносом. Другая его сторона — это флуктуации излучения фрактальных структур [Зосимов, Лямшев, 1995]. Фрактальные свойства геосистем в сейсмоакустических и электромагнитных полях наблюдаются и проявляются на разных временных и пространственных масштабах.

Очевидно, в этом случае обычно имеют дело с диффузионными процессами на перколирующих фрактальных структурах. При этом замедление диффузии оказывается настолько су-

щественным, что измеряемые физические величины изменяются медленнее первой производной, и этот эффект можно попытаться получить с помощью дробных производных. Необходимое обобщение в этом случае может быть реализовано путем использования методом дробной динамики [Зеленый, Милованов, 2004; Тарасов, 2009].

Предпримем попытку рассмотрения в этом приближении уравнения генерации спонтанной эмиссии, обобщающего уравнения (2) на случай геосистем с многомасштабными корреляциями в пространстве и времени. Как известно, в этом случае важнейший метод для построения моделей сложных сред, процессов и явлений — это дробный математический анализ. Новые возможности в их описании появляются здесь на основе введения интегродифференциальных операторов дробного порядка по времени и координатам.

Математический формализм, лежащий в основе дробной динамики, представляется весьма привлекательным, поскольку он не нарушает аналитическую структуру базовых уравнений математической физики. С учетом этого обстоятельства уравнение генерации (2) примет следующий вид:

$$\frac{\partial^{\alpha} B_i}{\partial t^{\alpha}} = \gamma_{ij} \nabla_r^{2\beta} B_j + F_i(\mathbf{B}), \qquad (3)$$

в котором дробная производная по времени $\partial^{\alpha}/\partial_t^{\alpha}$ выражается через интегродифференциальный оператор Римана—Лиувилля:

$$\frac{\partial^{\alpha}}{\partial t^{\alpha}} \varphi(t, \mathbf{r}) = \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \frac{\partial^m}{\partial t^m} \int_0^t \frac{\varphi(\tau, \mathbf{r})\, d\tau}{(t-\tau)^{1+\alpha-m}},$$

где $m-1<\alpha\le m$ при некотором целом m. Она переходит в обычную $\partial\varphi/\partial t$ при $\alpha\to 1$, $\nabla_r^{2\beta} \equiv \nabla_r^{\beta}\nabla_r^{\beta}$ можно рассматривать как обобщенный лапласиан, задающий диффузионный тип пространственного взаимодействия.

С учетом известного определения производной дробного порядка β (оператора Рисса—Вейля)

$$\frac{\partial^{\beta}}{\partial x_i^{\beta}}\,\varphi(\mathbf{r},t)=\frac{1}{\Gamma(1-\beta)}\,\frac{\partial}{\partial x_i}\int\limits_{-\infty}^{x_i}\frac{dx_i'}{(x_i-x_i')}\,\varphi(\mathbf{r}',t)$$

где $\mathbf{r}=e^i x_i$, e^i — единичный вектор в направлении i=1, ..., n, и рассматривая $\partial^{\beta}/\partial x_i^{\beta}$ как компоненты вектора $\partial^{\beta}/\partial \mathbf{r}^{\beta}$, приходим к известному естественному обобщению градиента $\nabla_r^{\beta} \equiv \equiv \partial^{\beta}/\partial \mathbf{r}^{\beta}=e^i\partial^{\beta}/\partial x_i^{\beta}$, а скалярное произведение операторов дробного дифференцирования $\nabla_r^{2\beta}\equiv\nabla_r^{\beta}\nabla_r^{\beta}$ определяет обобщенный лапласиан: $\Delta r\equiv\Delta_r^2$ при $\beta\to 1$ [Зеленый, Милованов, 2004].

Обратим внимание, что интегрирование в этом случае начинается с минус бесконечности. Это связано с естественным предположением о том, что перколирующее множество содержит сколь угодно большие пространственные масштабы. Таким образом, переходим к дробному уравнению генерации с оператором Римана—Лиувилля по времени и Рисса—Вейля по пространственной переменной, описывающему, как известно, так называемые фрактонные возбуждения в рассматриваемых геосистемах с многомасштабными пространственно-временными корреляциями. Весьма вероятно, что такой синтез дробной динамики и фрактальной топологии дает новые возможности самосогласованного описания спонтанных эмиссий литосферного происхождения. Весьма важно, что уравнение генерации (3) описывает фрактонную ветвь электромагнитных и связанных с ними акустических возбуждений в перколирующей геосреде, локализованных из-за ее фрактальной геометрической структуры. Эта фрактонная ветвь в определенном смысле является аналогом и эквивалентом спонтанных электромагнитных или сейсмоакустических эмиссий (колебаний) при переходе от регулярной геометрии к фрактальным распределениям. По сути, теория фрактонов ориентирована на решение задач, связанных с распространением возмущений в неоднородных и неупорядоченных средах, которые не могут быть описаны моделью сплошной среды. Это, прежде всего, распространение данных возмущений и волн во фрактальных средах, являющихся средой распространения, и генерация этих излучений фрактальными

структурами, что, очевидно, позволяет продвинуться в исследовании явлений и объектов, не поддающихся пониманию и количественному описанию классическими методами. Заметим также, что внешние воздействия на геосистему активизируют упомянутые механизмы генерации, вызывая всплески мощности эмиссионного излучения в широкой полосе частот [Зосимов, Лямшев, 1995; Зеленый, Милованов, 2004; Иудин, 2005].

Сейсмические «гвозди» и нелинейная динамика. Как известно, в последние годы при исследовании пространственного распределения гипоцентров сейсмических событий по данным обширных каталогов землетрясений обнаружены характерные сейсмофокальные структуры — субвертикальные кластеры очагов, которые получили название сейсмических «гвоздей» [Захаров, 2014]. Их размеры по вертикали составляют порядка 10—50 км, а глубины заложения — до 90 км. Их возникновение ассоциируется с взаимодействием флюидных потоков и тектонических деформаций. Весьма необычно, что для некоторых из выявленных «гвоздей» не обнаружена их приуроченность к разломным зонам или другим установленным структурам. Кроме того, в результате разработки алгоритмов спонтанной эмиссионной томографии появилась возможность визуализации источников шумовой компоненты сейсмического поля в геосреде [Чеботарева, 2011]. Обнаружен новый тип сейсмических объектов — субвертикальной узколокализованной системы источников сейсмического излучения, уходящей на значительные глубины [Чеботарева, 2011], ассоциируемой с локальной высокопроницаемой зоной деструкции.

Существует несколько схем, объясняющих на качественном уровне возможность формирования подобных «всплывающих» объектов сейсмического шума. Это механизм «вплытия» к земной поверхности областей аномального разуплотнения пород, сопровождающийся характерными сдвиговыми деформациями. Другой акцентирует внимание на возможности дрейфа к дневной поверхности связанной системы флюидозаполненных трещин и пор в твердой части литосферы. При этом данные объекты могут иметь не только чисто сейсмические или

сейсмоакустические, но и сейсмоэлектромагнитные проявления [Чеботарева, 2011].

Важная роль в их генерации отводится перколяционному механизму, в основе которого лежит фрактальная динамика активных систем, в частности перколяционного диффузионного фронта и связанных с ним переходных процессов [Иудин, 2005]. Он может быть связан с критическим уровнем пористости в локальных областях твердой литосферы либо с образованием и перемещением связной области трещин, что обеспечивает появление зон геометрической связности порового пространства (зон прозрачности) — кластеров флюидной компоненты [Гийон и др., 1991]. В результате присоединения к этому диффузионному фронту и отсоединения от него этих кластеров с широким диапазоном размеров реализуются условия генерации так называемого «геометрического шума» [Зосимов, Лямшев, 1995; Иудин, 2005] — сейсмического, сейсмоакустического, сейсмоэлектромагнитного, электромагнитного.

Обратим внимание на универсальный характер этого эффекта. Однако следует предусмотреть также возможность реализации и других механизмов и процессов генерации спонтанных эмиссий в трехмерных активных геосистемах с фрактальной структурой.

Заключение. Возвращаясь к эпиграфу, заметим, что исследование нелинейной динамики активных геосистем, формирования самоподобных диссипативных структур, построение и анализ моделей, описывающих их фрактальную динамику, представляет собой весьма сложную задачу. Однако автор надеется, что ему удалось конкретизировать и донести до возможного читателя некоторые идеи и нетрадиционные подходы к описанию механизмов генерации спонтанных эмиссий литосферы как многомасштабной иерархически организованной нелинейной динамической системы. Весьма примечательно, что эволюция процессов и объектов в литосфере, как известно, не может быть реализована вне рамок автоволновых процессов, являющихся пространственно-временными структурами. Возрастающий интерес к этим проблемам вызван прежде всего тем

обстоятельством, что твердотельные среды, формирующиеся в условиях диссипации энергии в открытых системах, являются фрактальными. Эти твердотельные фрактальные системы представляют собой особый тип структурного состояния вещества, характеризующегося существенными изменениями многих его физических свойств. Однако фрактальные структуры геосреды, формирующиеся в специфических физико-химических условиях литосферы, все еще остаются слабоизученными. В итоге появляется возможность различного физического контекста и реализации механизмов генерации и распространения спонтанных эмиссий на разных масштабных уровнях геометрически самоподобной геосреды. В частности, в соответствии с известной флуктационно-диссипативной теоремой физики их генерация обусловлена диффузионными процессами перераспределения энергии и вещества в геосреде путем диссипации или направленного переноса диффундирующего агента под действием химического потенциала, а в более частном случае — градиента концентрации.

Очевидно, в рассматриваемом контексте можно выделить перколяционный, динамический и релаксационный механизмы генерации спонтанных эмиссий. В более широком смысле поле спонтанных эмиссий может быть истолковано в качестве «связности» внутренних степеней свободы формирования и эволюции автоструктур в нестационарной активной геосистеме, а в качестве одного из основных механизмов генерации — переходное рассеяние фрактального типа.

Важный класс собственных динамических степеней свободы, согласованных с фрактальной геометрией геосистемы, образует фрактонные колебательные возбуждения или фрактоны, отражающие связи между структурными свойствами геосистемы и процессами в ней, протекающими на различных пространственных масштабах. В основе этого подхода описания спонтанных эмиссий лежит синтез дробной динамики и фрактальной топологии, в частности дробное уравнение генерации. Фрактонная ветвь его решений, как известно, это локализованные сейсмоакустические и электромагнитные возбуждения,

которые являются аналогом обычных возбуждений при переходе от регулярной геометрии геосреды к ее фрактальным модификациям. Заметим, что в рамках этих представлений появляется перспектива адекватной интерпретации многих видов активности геосистем, включая сейсмический процесс и спонтанную электромагнитную эмиссию, а также упоминавшиеся выше три механизма ее генерации. Существенно, что в этом случае удается продвинуться в последовательном изложении известных результатов, относящихся к исследованию процессов волн нового типа во фрактальных структурах, и фрактальных структур, присущих этим процессам в реальной геосреде. При этом тот факт, что перколяция является критическим процессом, подразумевает степенной характер связанных с ним физических величин.

Спонтанные эмиссии литосферы оказываются тесно связанными с динамикой автоструктур и их ансамблей, причем на передний план выходят разрывные автоколебания с частичным сбросом энергии в виде электромагнитной и сейсмоакустической эмиссий, при этом фрактальные свойства геосистем проявляются и наблюдаются в их полях на различных временных и пространственных масштабах.

Таким образом, подводя итоги, можно констатировать, что спонтанная электромагнитная активность — это непрерывный во времени непереходный процесс, нестационарная активность геосреды, ее метастабильные состояния и последовательность таких состояний. При этом следует отметить важную роль в генерации спонтанных эмиссий фронтов критичности, в частности перколяционного диффузионного фронта и связанных с ними переходных процессов в неоднородной нестационарной фрактальной геосреде — переходного фрактального рассеяния.

О прогнозируемости активных геосистем: метастабильность и устойчивые переходы вместо аттракторов

Геофизический журнал,
№ 6, Т. 38, 2016, С.3—24.

Введение. Несмотря на значительный рост сетей мониторинга за сейсмической активностью, развитие новых технологий исследований и обработки данных, увеличивающееся проникновение в сейсмологию методов нелинейной динамики сложных систем, многие ключевые вопросы прогноза и прогнозируемости геосистем оказались весьма затруднительными и все еще весьма далеки от своего разрешения. Очевидно, трудности решения проблемы связаны со сложностью исследуемого объекта — геосреды как активной динамической системы с диффузией, которая в зависимости от условий возбуждения может проявлять свойства детерминированных, хаотических и сложных систем. Математические модели таких распределенных активных сред с конечным порогом неустойчивости весьма сложны, их общее описание не представляется возможным, а каждый новый достаточно глубоко исследованный пример таких систем, как правило, обнаруживает

проявления новых типов самоорганизации. При этом нетрадиционность задач современной геодинамической теории таких систем прежде всего связана с явлениями структурообразования, превращением одних структур в другие при изменении параметров геосреды.

Очевидно, вопросы динамики и прогнозируемости таких систем слишком фундаментальны, сложны и противоречивы, и слабо адаптированы к решению прикладных задач. Не удивительно, что в этой области исследований до настоящего времени продолжаются активные обсуждения и дебаты, часто слабоаргументированные, акцентирующие внимание на ее частичных аспектах, нередко приобретающие весьма тоталитарные формы.

Современное состояние дел в этой отрасли исследований — всплески оптимизма и близости достижения цели, скепсис, иллюзии, безысходность или невозможность решения проблемы прогноза, особенно краткосрочного. Заметим, что с точки зрения приложений мы нуждаемся не в прогнозе вообще, а до того момента времени, когда он еще может быть актуальным. В этом контексте весьма уместно попытаться посмотреть на проблему прогноза и прогнозируемости с учетом современных позиций и достижений нелинейной динамики сложных систем, в частности неравновесных сред, для процессов структурообразования в которых характерны пространственное развитие структур (автоструктур) и хаотическая динамика ансамблей автоструктур. Другой весьма важный аспект проблемы, на который не обращалось должного внимания, — влияние шумов и флуктуаций различной природы на режимы функционирования распределенных нелинейных динамических систем. Как известно, источники шума в таких динамических системах могут индуцировать новые режимы их функционирования, которые не могли быть реализованными в его отсутствие, например вызванные шумом автоколебания, образование более упорядоченных структур, увеличение степени когерентности и другие эффекты.

Яркий пример указанного типа поведения системы — присутствие $1/f$ шума (или фликкер-шума), усреднение которого по времени дает непредсказуемый, меняющийся от реализации к

реализации результат с разбросом, неубывающим или даже возрастающим при увеличении длительности времени усреднения. Еще один интересный аспект проблемы — статистика наиболее важных с прикладной точки зрения сильных (экстремальных) событий оказывается существенно иной, чем обычная статистика больших чисел.

Ряд важных, по мнению автора, вопросов проблемы прогнозируемости и прогноза динамики геосистем рассмотрен в предыдущих публикациях [Шуман, 2014а, б, в; 2015а, б; 2016а, б]. В настоящей статье на основе и с учетом уже выполненных исследований будет продолжено рассмотрение некоторых элементов и деталей проблемы, на которые обращалось недостаточное внимание, но которые, возможно, могут определять дальнейшие направления исследований.

Внимание будет концентрироваться на более адекватных и современных представлениях о геосреде как активной (возбудимой) динамической системе с диффузией, пронизываемой потоками энергии и вещества из низов литосферы, более современной трактовки и понимания сейсмического процесса как раздела теории геодинамических систем, продукта формирования, поддержания и преобразования автоструктур или диссипативных структур. Использование этих принципов и подходов, на наш взгляд, является перспективным и привлекательным для приложений.

Изложение организовано следующим образом. Статья начинается с краткого, фрагментарного изложения состояния вопроса. Далее приводятся сведения об особенностях геосистем и их динамики, после чего рассматриваются некоторые вопросы хаоса, сейсмичности, спонтанного сейсмоэлектромагнетизма, концептуальных основ мониторинга, некоторых особенностей аттракторов систем с шумом, странно-аттракторного подхода и новой парадигмы прогноза, возможных направлений дальнейших исследований.

О состоянии вопроса. Весьма удивительно и даже парадоксально, но до сравнительно недавнего времени (середины XX в.) среди физиков отмечалась уверенность в потенциально

неограниченных возможностях классической физики предсказания поведения сложных систем, располагая лишь динамическими уравнениями и начальными условиями [Кравцов, 1989]. И если и допускалось существование принципиально неустранимых причин непредсказуемости, то не в характере уравнений классической физики. Однако к началу 1970-х годов, в основном благодаря классическим работам В. И. Арнольда, А. Н. Колмогорова, Э. Н. Лоренцо, Я. Г. Синая, Ф. Такенса и ряда других исследователей, произошел пересмотр этих уже устоявшихся представлений о «предсказуемой динамике». Проблема предсказуемости оказалась в центре внимания многих направлений нелинейной динамики, в частности при исследовании процессов в сильнонеравновесных открытых системах, пронизываемых потоками энергии и вещества. В центре ее интересов оказывается все большее число нелинейных распределенных сред, структурообразование в которых демонстрирует в широком диапазоне масштабов и параметров пространственно-временной скейлинг [Иудин, 2005]. Получило интенсивное развитие новое направление исследований — предсказуемости хаотических систем [Ахромеева и др., 2007; Лоскутов, Михайлов, 2007; Лоскутов, 2010]. Обнаружено весьма примечательное свойство хаотических динамических систем: они оказались весьма чувствительными к внешним воздействиям. Показано, что теорию сложных систем можно рассматривать в качестве общей теории самоорганизации в средах весьма различной природы. Стало очевидным, что проблема предсказуемости в общем случае тесно связана с решением задач нелинейной динамики и теории сложных систем.

Для геофизики, в частности сейсмологии, особо актуальным становится вопрос о прогнозируемости активных геосистем с делокализованными источниками энергии и прогноза конкретных сейсмических событий. Значительные усилия по его решению предприняты в последние годы математиками и физиками, стоящими на «математической» точке зрения. Однако, несмотря на заметный рост теоретических разработок и экспериментальных данных, физической теории сейсмического процесса

пока нет [Кособоков, 2004; Шаповал, 2011; Гуфельд, 2013; Гуфельд, Новоселов, 2014; Родкин, 2016]. До настоящего времени продолжаются бурные дискуссии по самому существу вопросов прогноза, особенно краткосрочного, и прогнозируемости реальных геосистем. При этом наименее дискуссионной здесь является необходимость новой теории. Одной феноменологии здесь явно недостаточно.

Упомянем некоторые из высказанных по этому вопросу точек зрения и начнем с часто цитируемого высказывания Чарльза Рихтера: «только дураки и шарлатаны предсказывают землетрясение». Приведем более рафинированное и изящное высказывание В. И. Кейлиса-Борока: «прогноз, не скажу, возможен, но, по крайней мере, не невозможен» [Кособоков, 2004]. О принципиальной непредсказуемости эпицентральной зоны сильнейших землетрясений утверждается в работе [Короновский, Наймарк, 2012].

«На новом материале… подтверждено понимание сейсмического процесса как фундаментального следствия эволюции тектонической системы к состоянию СОК, в котором невозможен реальный прогноз динамики и катастроф» [Захаров, 2014]. «Не исключено, что точный краткосрочный прогноз вообще недостижим. Что касается долгосрочного и среднесрочного прогноза, то его нужно считать лишь оценкой возможной потенциальной опасности» [Гуфельд, Новоселов, 2014].

Исследования по прогнозу сейсмичности «…должны иметь статус фундаментальных, а не прикладных, обязанных давать надежный прогноз того, что объективно не поддается прогнозированию» [Наймарк, Захаров, 2012]. Однако столь максималистские представления о принципиальной непредсказуемости землетрясений не являются общепринятыми и, по-существу, были опровергнуты [Родкин, 2016]. Так, в работе [Кособоков, 2004] положительно решается фундаментальный вопрос сейсмологии о предсказуемости сильных землетрясений.

Показано, что широкий класс сложных систем с самоорганизованной критичностью (СОК) предсказуем с помощью универсальных предвестников, а свойства прогнозируемости и ма-

сштабной инвариантности не противоречат друг другу [Шаповал, 2011].

Сошлемся еще на один пример — исследование А. А. Любушина по поиску предвестников сильных сейсмических событий как эффектов увеличения синхронизации (когерентного поведения) скалярных компонент многомерных временных рядов систем мониторинга низкочастотных микросейсм [Любушин, 2013]. Предложенный метод поиска предвестников основан на определении статистически значимого уменьшения среднего значения ширины носителя мультифрактального спектра сингулярности (когерентности) вариаций его же параметров. Обратим внимание и на другие важные обстоятельства. Так, еще в 1970-х годах установлена фундаментальная закономерность разрушения материалов: любому полному разрушению предшествует более или менее длительный подготовительный период [Макаров, 2012]. Можно также привести тот факт, который находит все большее признание, что предшествующие сильным сейсмическим событиям явления, в основном непосредственно перед ним, существуют [Хаякава, Коровкин, 2011].

Необходимость новой физической теории сейсмичности очевидна. Однако уместно напомнить, что, как правило, ни одна крупная проблема не решалась в русле исключительно тех идей и представлений, которые существовали при ее постановке. Кроме того, каждая новая фундаментальная теория обычно предоставляла не только новые возможности, но и зачастую лишала многих иллюзий и заблуждений. Однако в любом случае динамическое видение проблемы прогноза и прогнозируемости геосистем остается приоритетным, хотя в последнее время считается наиболее перспективным (или даже безальтернативным) направлением по краткосрочному прогнозу сейсмичности применение сейсмических средств, позволяющих отслеживать деформации земной поверхности и наблюдений за ионосферой [Пулинец, Узунов, 2011; Хаякава; Коровкин, 2011; Пулинец и др., 2012]. Новый известный отблеск или всплеск энтузиазма — «…несмотря на известный пессимизм, даже отрицание принципиальной возможности краткосрочного прогноза …

сегодня можно утверждать, что эта важная проблема геофизики фактически решена» [Дода и др., 2013]. И такой вывод сделан на основании некоторой эмпирической схемы прогноза, фактически не опирающейся на какие-либо конкретные свойства геосистемы и протекающие в ней процессы. Было бы ошибочным предполагать, что опыт мониторинга с использованием спутниковых технологий при всех его достоинствах открывает только радужные перспективы.

Важная особенность дистанционных систем — возможность получения геолого-геофизической информации для обширных регионов, что труднодостижимо при наземном мониторинге. Тем не менее тезис об безальтернативности спутниковых технологий, широко обсуждаемый в настоящее время многими геофизиками, не представляется бесспорным [Гуфельд, 2013; Шуман, 2016б]. Это не прогноз сейсмического события в его классическом традиционном понимании. Метод не ориентирован на получение прямых сведений о состоянии геосреды и протекающих в ней процессах. Это, скорее, прогноз и констатация особенностей временной и пространственной динамики радонового поля, запуска и развития обусловленного им процесса от поверхности земли до магнитосферы, включая такие параметры, как вертикальный профиль температуры и влажности, электронной концентрации, локальные характеристики ионосферной плазмы, потока инфракрасного излучения, конфигурацию облачного и покрова и др. [Пулинец, Узунов, 2011; Пулинец и др., 2012]. Трудности решения проблемы в этом случае очевидны: соответствующие изменения параметров в системе литосфера—атмосфера—ионосфера достаточно малы и в ряде случаев обнаруживаются только статистически. Весьма дискуссионно и использование с этой целью сейсмоэлектромагнитных явлений, которые «…имеют несейсмическую природу и поэтому не имеют практически ничего общего с сейсмологией» [Хаякава, Коровкин, 2011]. Геология и сейсмичность здесь выступают лишь в качестве источника информации о литосфере. Однако в любом случае наземные сейсмические методы контроля останутся ведущими при диагностике глубинного строе-

ния сейсмоактивных зон и изменения их параметров, хотя предвестниковые проявления катастрофических сейсмических событий, несомненно, присущи не только сейсмичности, но и спонтанному электромагнитному и сейсмоэлектромагнитному излучению, генерируемому литосферой.

Динамические системы и нелинейно-динамический подход к изучению геосистем. Как известно, подход, основанный на идеях, методах и принципах нелинейной динамики, в настоящее время является одним из важных, эффективных и приоритетных направлений исследований современной геофизики и сейсмологии. Динамические модели геосистем, построенные на базе обширных экспериментальных наблюдений, открыли широкие возможности для интерпретации, понимания, а в ряде случаев и предсказания динамических механизмов функционирования геосреды как открытой многомасштабной иерархически организованной диссипативной системы, через которую могут протекать большие потоки энергии и вещества. Характерные свойства геосистем — диссипативность динамики, компенсация энергопотерь за счет внешних источников, активность их отдельных элементов. Ввиду актуальности проблемы начнем с некоторых стандартных, ставших уже классическими определений.

Систему называют динамической, если определен выбор величин, называемых динамическими переменными, которые характеризуют мгновенное состояние, и задан закон или правило, позволяющие по начальному состоянию системы определить ее состояние в любой последующий момент времени [Лоскутов, Михайлов, 2007; Кузнецов, 2011]. Множество всевозможных состояний образует ее фазовое пространство, образованное всеми параметрами, необходимыми для описания. Фазовый портрет — это траектория развития системы, но в пространстве ее параметров. При этом положение системы в фазовом портрете в любой конкретный момент времени задается точкой в ее фазовом пространстве.

Как известно, для описания систем с непрерывным временем обычно используются дифференциальные уравнения вида (или их системы)

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \mathbf{P}\ (\mathbf{u}, \lambda), \tag{1}$$

где **u** — мерный вектор состояния, **P** — нелинейный оператор, λ — параметры системы.

В соответствии с теоремой существования и единственности их решения, по заданному состоянию в некоторый момент времени можно однозначно найти состояние в последующие и предыдущие моменты времени. Системы с дискретным временем определяют обычно с помощью отображения, задающего трансформацию состояния в течение одного шага:

$$\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{g}(\mathbf{u}_n),$$

где **g** — векторная функция, **u** — вектор состояния. В этом случае фазовая траектория задается дискретной последовательностью точек.

Оба рассмотренных класса систем с непрерывным и дискретным временем тесно связаны между собой, причем переход от одних к другим осуществляется с помощью построения, известного в литературе как «сечение Пуанкаре» [Кузнецов, 2011].

Выделяют консервативные и диссипативные системы. Для первых характерно сохранение «памяти» о начальном состоянии, для других — в течение некоторого времени динамический режим становится независимым от начального состояния. Подобный подход, опирающийся на успешный опыт динамического моделирования в различных областях науки, весьма распространен. Обычно он включает в себя набор элементарных моделей, развитой технологии анализа и доказательств с целью получения информации о поведении системы «в целом». Важную роль в подобном описании играет геометрическое представление эволюции исследуемой системы в относительно малоразмерных проекциях ее фазового пространства. Поведение системы в этом случае может быть описано в терминах аттракторов, переходных состояний, устойчивости, бифуркаций и др. [Рабинович, Мюезинолу, 2010].

Одна из основных задач нелинейно-динамического подхода — выработка на основе экспериментальных данных адекватных динамических образов ключевых явлений и процессов, происходящих в исследуемой системе, построение на их основе базовых моделей и изучение динамически этих моделей. Выделяют обычно несколько этапов такого изучения [Некоркин, 2008]:

– обнаружение структурно-устойчивых систем и явлений, не изменяющих свойств при относительно малых вариациях их параметров;
– детальный анализ структуры фазового пространства (пространства состояний) системы с целью диагностики всех возможных типов поведения системы;
– исследование тенденций развития (эволюции) процессов при изменении ее параметров.

Важно, что приведенные определения не исключают возможности хаотического поведения системы, когда зависимость наблюдаемых величин от времени выглядит как случайный процесс. Как известно, хаос оказался весьма типичным явлением в системах различной природы. Напомним, если говорится о хаосе, обычно подразумевается, что изменение во времени состояния системы является случайным (его нельзя однозначно предсказать) и невоспроизводимым (процесс нельзя повторить). Для того чтобы проводить различие между регулярной и хаотической динамикой на количественном уровне, обычно используют показатели Ляпунова [Лоскутов, Михайлов, 2007; Лоскутов, 2010; Кузнецов, 2011]. В пространстве состояний систем с диссипацией хаос ассоциируется с присутствием странного аттрактора, обладающего фрактальной структурой, причем наличие в спектре показателей Ляпунова (спектр показателей Ляпунова аттрактора понимается как спектр показателей для типичной траектории на аттракторе) хотя бы одного положительного показателя свидетельствует о том, что аттрактор — хаотический, а по известному спектру этих показателей оценить фрактальную размерность аттрактора [Лоскутов, 2010; Кузнецов, 2011]. Установлено, что поведение системы со странным аттрактором характеризуется сочетанием глобального сжатия

фазового объема системы с локальной неустойчивостью фазовых траекторий. При этом наличие источников шума в нелинейных динамических системах может индуцировать новые режимы их функционирования, которые не могут быть реализованы в его отсутствие.

Согласно А. Ю. Лоскутову [Лоскутов, 2010], аналитических результатов, касающихся существования странных аттракторов, относительно мало, а само это понятие приобрело некоторый собирательный контекст — этим хотят подчеркнуть хаотичность изучаемой системы: «этот термин является скорее парадигмой, чем характеристикой какого-либо математического объекта». И более того, для большинства сложных систем, с которыми обычно имеют дело в приложениях, далеко не всегда удается вывести какие-либо уравнения, исходя из физических принципов, и, соответственно, их невозможно исследовать в рамках модели (1).

Исследования начали смещаться в сторону изучения активных систем, в которых присутствуют потоки энергии от внешнего источника и диссипируемых ими. Именно благодаря этим потокам системы становятся активными (возбудимыми), т. е. приобретают способность к автономному образованию структур [Лоскутов, Михайлов, 2007]. Такие системы демонстрируют удивительное разнообразие их динамического поведения, и общей их теории не существует. Аналитические возможности исследования таких структур (автоструктур) и их ансамблей опираются, в основном, на решение приближенных или модельных уравнений. Численные же эксперименты весьма затруднительны и трудоемки.

Как известно, исследование высокоорганизованных пространственно-временных структур в средах с диссипацией, далеких от термодинамического равновесия, является одной из центральных проблем современной геодинамики. Существенно, что эволюция процессов и структур в подобных системах не может осуществляться вне рамок автоволновых процессов, являющихся пространственно-временными структурами, причем наличие пространственно-временной структуры — их фундаментальное и всеобщее свойство [Эбелинг, 1979].

Выделяют два типа эволюционных процессов:
– временная эволюция к неравновесному стационарному состоянию;
– эволюция через последовательность таких состояний [Рабинович, Мюезинолу, 2010].

Особый круг возникающих вопросов — воздействие шумов различной природы на такие системы, в частности на формирование и разрушение пространственно-временных структур (автоструктур), и вызванной шумом неустойчивости, влияние шума на мультистабильность. Важно, что различие в реакциях системы на внешний шум может служить фактором, инструментом их диагностики, в частности режима функционирования — автоколебательного или возбудимого, а также типа активной среды — возбудимой, автоколебательной или бистабильной.

Таким образом, нетрадиционность задач современной теории неравновесных сред связана, прежде всего, с явлениями структурообразования, формирования автоструктур, их превращений одних в другие при изменении параметров геосреды — бифуркации пространственных образов [Гапонов-Грехов, Рабинович, 1987а, б]. Такая постановка задачи выглядит почти безнадежной: «…метастабильным образом в фазовом пространстве динамической модели отвечают уже не аттракторы, а переходные множества траекторий, внутри которых изображающая точка проводит основное время». Да и сами автоструктуры — весьма нетривиальный объект исследований. Для их описания необходимы новые идеи и подходы [Рабинович, Мюезинолу, 2010], в частности разработки новых моделей, методов и адекватных образов и понятий, общих для неравновесных сред произвольной природы. При этом, очевидно, в открытых системах можно выделить два класса эволюционных процессов: временная эволюция к неравновесному квазистационарному состоянию и эволюция через последовательность таких состояний. Важно, что определяющими признаками неравновесного критического поведения систем, далеких от термодинамического равновесия, являются критическое замедление времен релаксации системы и аномально большие времена корреляции раз-

личных состояний системы [Руманов, 2013]. Обычно эти особенности ведут к реализации динамического скейлингового поведения системы. Отсюда следует вывод о возможности существования универсальных алгоритмов прогноза эволюции, кризисов и катастроф для систем весьма различной природы.

Хаос, сейсмичность и прогнозируемость. Как уже упоминалось, кластерная сущность организации геосреды обусловливает системный анализ ее подсистем и эволюционирующих объектов (автоструктур и их ансамблей), которые в зависимости от иерархического уровня своей организации проявляют свойства детерминированных, стохастических и хаотических сложных систем. В ней существуют комплексы нелинейных взаимодействий между физическими полями, структурами и подсистемами. На эту открытую нелинейную систему и происходящие в ней процессы действуют шумы различной природы и цветности, в том числе и стохастические, потоки энергии и вещества, способные проявляться на определенных (соответствующих их масштабу) иерархических уровнях организации.

Детерминированный или динамический хаос — типичное явление, присущее исключительно нелинейным системам с размерностью $N>3$. Для некоторых классов диссипативных систем получены качественные критерии хаотичности их динамики, в частности свойство гиперболичности, означающее наличие в фазовом пространстве странного аттрактора [Кузнецов, 2011]. Была введена в рассмотрение некая особая разновидность таких аттракторов — однородно-гиперболические аттракторы, обладающие свойством структурной устойчивости, т. е. устройство фазового пространства и динамика системы не чувствительны к малым возмущениям параметров. Это привело к определению хаотического поведения системы через ее чувствительную зависимость от начальных условий. При этом мерой хаотичности могут служить показатели Ляпунова: если имеются положительные показатели, то поведение динамической системы будет хаотическим.

Хаотическая природа динамики системы на однородно гиперболических аттракторах получила безупречное математиче-

ское обоснование. Однако по мере накопления конкретных экспериментальных примеров стало ясно, что, вообще говоря, эта теория зачастую не имеет прямого отношения к реальным системам [Кузнецов, 2011]. Были предприняты усилия на разработку различных обобщений, применимых к более широкому классу реальных систем. В частности, введены в рассмотрение понятия квазигиперболических аттракторов, неоднородно-гиперболических аттракторов, квазиаттракторов (см. [Кузнецов, 2011] и приведенные там ссылки).

Существенно, что для динамического хаоса существует некоторый характерный временной масштаб («горизонт предсказуемости или прогноза»), логарифмически зависящий от нетечности задания начальных условий, за пределами которого предсказание поведения состояний системы становится невозможным. И этот «горизонт» весьма ограничен. Заметим, что известная теорема Такенса подготовила соответствующую почву для построения алгоритмов предсказания хаотических процессов на основании использования информации о динамической природе наблюдаемых временных рядов (сигналов), генерируемых системой [Лоскутов, 2010]. В настоящее время термин «странный аттрактор» приобрел некий собирательный смысл и является скорее парадигмой, чем характеристикой какого-либо математического объекта: существуют странные хаотические аттракторы, которые имеют фрактальную структуру, но при этом система не обладает хаосом ни в каком смысле [Лоскутов, 2010]. Понятно, что широкое использование понятия «странный аттрактор» далеко не всегда оказывается безупречным и оправданным. По этой причине, согласно А. Ю. Лоскутову [Лоскутов, 2010], если структура аттрактора хаотической системы неизвестна, что является обычным при экспериментальных исследованиях, то правильнее называть такие аттракторы хаотическими, акцентируя внимание на сложности траекторий системы.

Различия между детерминированным и истинным (белым шумом), т. е. регулярной и хаотической динамикой, на количественном уровне могут быть обнаружены на основании некоторых параметров или характеристик. В частности, для этого используют показатели Ляпунова [Лоскутов, 2010].

Пусть $x(t)$ — типичная фазовая траектория системы, а $x_1(t)$ — близкая к ней траектория $x_1(t)=x(t)+\xi(t)$. Тогда, вводя в рассмотрение функцию

$$x\left(\xi(0)\right)=\frac{1}{t}\ l_n\frac{\left|\xi(t)\right|}{\left|\xi(0)\right|},$$

которая определена на векторах начального смещения $\xi(0)$ таких, что $\left|\xi(0)\right|=\xi$, где $\xi\to 0$, получим ряд ее значений $\{\lambda_i\}$, $i=1,2,...,n$, в зависимости от направления вектора $\xi(0)$, которые называются ляпуновским спектром. Если имеются положительные показатели, то поведение системы будет хаотическим. При этом значение времени предсказуемости системы может быть оценено по следующей упрощенной формуле:

$$T_\lambda \sim \lambda^{-1}{}_{\max},$$

где $\lambda_{\max}$ — максимальный показатель Ляпунова. Таким образом, в принципиальном смысле на основании только экспериментальных данных можно оценить горизонт прогноза рассматриваемого процесса. Заметим, что спектр шумов в этом случае гораздо более равномерный и однородный, а реализация беспорядочна, в то время как спектр детерминированных хаотических движений может содержать пики на некоторых частотах, а реализация — участки, похожие на периодичности.

Заметим также, что детерминированный хаос — явление, присущее исключительно нелинейным системам. Ограниченность строгих хаотических результатов применительно к этим системам весьма затрудняет понимание этого универсального явления и, возможно, зачастую ведет к ошибочным интерпретациям экспериментальных данных.

Таким образом, в случае детерминированного хаоса предсказывать эволюцию системы оказывается возможным лишь на ограниченном временном интервале, а на больших временных інтервалах ее поведение приходится описывать уже статистическими методами.

Обратим внимание на конструктивный потенциал хаоса. В

частности, теория хаоса утверждает, что слабые изменения в системе могут порождать аномально большие следствия, а одной из центральных ее (теории) концепций является невозможность точного предсказания состояния системы. Но в то же время теория хаоса утверждает, что способ реализации таких сложных непредсказуемых нелинейных систем находит свое отражение в структуре странных аттракторов или во фрактальных параметрах. При этом вопрос о детерминированности системы, генерирующей нерегулярную реализацию процесса, является определяющим при решении задач идентификации и прогноза. Эти задачи для распределенных систем, очевидно, не могут быть решены без должного понимания механизмов появления пространственно-временного хаоса (хаотического режима, при котором корреляции убывают в пространстве и времени) и типичных бифуркаций, генерирующих нерегулярное поведение. Однако не существует какой-либо общепринятой и последовательной теории его возникновения. В теоретическом плане эту проблему можно свести к проблеме динамического хаоса в нелинейных системах уравнений в частных производных. Получить их общее решение, как правило, не представляется возможным. При численном же моделировании остаются скрытыми причины, определяющие характер процесса, и для установления его закономерностей требуется большое число расчетов и больших затрат времени из-за наличия быстроосциллирующих функций. Однако из условия длительного существования литосферы следует слабость хаотических движений в ней. Это существенно изменяет ситуацию: близкорасположенные траектории в этой пространственно-структурированной многомасштабной открытой системе с нелинейной динамикой никогда не удаляются далеко друг от друга. В ней, в отличие от полностью хаотических систем, характеризуемых «горизонтом прогноза», такая характеристика отсутствует и поэтому, в принципе, она допускает долгосрочный прогноз.

Далее, в рамках определения сейсмичности как распределения вероятностей сейсмической активности на фазовом пространстве сейсмотектонической системы или статистического

ансамбля состояний, проходимых такой геосистемой за некоторый достаточно длительный интервал времени и в русле ее адекватности модели детерминированного (динамического) хаоса, коснемся некоторых вопросов прогноза вероятностей сильных событий.

Как известно, динамический хаос, подобно случайному процессу (а в силу ряда причин, прежде всего, отсутствием соответствующей физической теории, мы вынуждены относиться к сейсмичности как к случайному процессу), требует статистического описания [Герцик, 2008]. В его основе лежит фундаментальная теорема теории вероятностей — так называемая центральная предельная теорема.

Как известно, она содержит и объединяет совокупность теорем с различной степенью общности и применимости, призванных дать ответ на вопрос о том, как распределена сумма независимых случайных величин. Если распределение такой суммы стремится к нормальному (гауссовому) распределению, то при описании статистических характеристик процесса особая роль принадлежит корреляционной теории случайных процессов, в которой рассматриваются только одномерные и двумерные распределения.

Обычно корреляционные функции записывают в симметризованном виде, в частности для компонент сейсмоэлектромагнитных полей **B**:

$$\gamma_{ij}\left(\mathbf{r},\mathbf{r}';t-t'\right) = \frac{1}{2}\left\langle B_i\left(r,t\right)B_j\left(\mathbf{r}',t'\right)+B_j\left(r',t'\right)B_i\left(\mathbf{r},t\right)\right\rangle, \qquad (2)$$

где угловые скобки означают усреднение по ансамблю.

При этом Фурье-образ корреляционной функции в соответствии с теоремой Винера—Хинчина представляет собой спектральную плотность флуктуацій:

$$\gamma_{ij}\left(\mathbf{r},\mathbf{r}';\omega\right)=\int_{-\infty}^{+\infty}\gamma_{ij}\left(\mathbf{r},\mathbf{r}';\ \ \tau\right)e^{\,i\omega\tau}\,d\varsigma\,. \qquad (3)$$

В рамках такой общей математической модели предприняты попытки реализации пространственно-временного прогноза

вероятностей сейсмических событий. При этом прогнозируются лишь текущие вероятности событий, а не сами события. Причем подчеркивается необходимость предвестников (предикторов), обладающих физическим смыслом, которые могут быть получены на основании представлений, пусть и приближенных, о физической природе сейсмичности [Герцик, 2008]. В рассматриваемом контексте кажется более естественной точка зрения, согласно которой сейсмический процесс является отражением как внутренних системных флуктуаций, так и внешних воздействий.

Как известно, реакция случайной системы на слабое внешнее воздействие, согласно флуктуационно-диссипативной теореме, определяется корреляционной функцией флуктуаций невозмущенной системы, доказательства которой основаны на предположениях, которые сводят систему к гауссовой стационарной. Однако реальные системы, как правило, структурированы, и по этой причине среднестатистическое среднее не обеспечивает достаточной количественной оценки реакции системы на такое воздействие. Структурированная система реагирует на внешнее воздействие более сложным образом [Рузмайкин, 2014]. Ее среднее состояние изменяется слабо, но сильно возрастает число экстремальных событий. Статистика последних обнаруживает весьма необычные свойства, в частности способность приходить группами, т. е. образовывать кластеры.

Статистическую основу для определения характеристик экстремальных событий представляет теорема Фишера—Типпета—Гнеденко (ФТГ) [Рузмайкин, 2014]. Трудность, однако, состоит в том, что экстремальные события (к примеру, форшоки, майншоки и афтершоки), как правило, не являются независимыми, обычно сгруппированы в кластеры, а сама ФТГ-теорема ориентирована на распределение интенсивности экстремальных событий и не отвечает на вопрос, какова частота их появлений. В итоге с практической точки зрения вопрос о режиме повторяемости таких событий, по-существу, остается открытым. В то же время экспериментально установлен эффект «загиба вниз» графика повторяемости в области редких экстре-

мально сильных событий, которые, как оказалось, происходят значительно чаще, чем это следует из закона Гутенберга—Рихтера. Известны попытки моделирования этого эффекта и возможностей реализации аномально сильных характеристических событий [Родкин и др., 2016].

Возможность быстрого изменения состояния геосистемы и реализация степенных законов (закона Гутенберга—Рихтера и законов, описывающих интенсивность потоков форшоков) позволяют объединить критические явления в геосистеме с сейсмическим процессом [Родкин, 2016]. Тогда, интерпретируя землетрясение как локальный фазовый переход между состояниями консолидации и разрушения геосреды, можно попытаться использовать некоторые результаты теории критических явлений применительно к сейсмичности. Такой подход, базирующийся на моделях интерпретации сейсмического события как критического явления и модели разрушения С. Н. Журкова, позволил привлечь к его изучению некоторые общие положения теории катастроф и неравновесной термодинамики. При этом в геофизической литературе отмечается определенное очарование теорией катастроф, в которой изучаются особенности так называемых гладких отображений и бифуркаций динамических систем. Причем исследуются главным образом сосредоточенные системы, описываемые набором обыкновенных дифференциальных уравнений [Лоскутов, 2010; Гульельми, 2015]:

$$\frac{d\psi}{dt} = \nu\left(\psi, a\right), \tag{4}$$

где $\psi\left(t = \{\psi_1, \psi_2, ..., \psi_n\}\right)$ — совокупность динамических переменных, $\nu = \{v_1, v_2, ..., v_n\}$ — векторная функция заданной гладкости, определенная в некоторой области $M = R^n$, v: $M - R$, a — набор (или совокупность) параметров, M — фазовое пространство системы (4). Геометрически систему (4) можно интерпретировать в качестве некоторого векторного поля, которое каждой точке $\psi \in M$ ставит в соответствие вектор **v**. Система (4) удовлетворяет основной теореме локального существования и единст-

венности решения для каждого заданного начального состояния $\psi(0)=\psi_0$ и любого гладкого векторного поля v имеется единственная фазовая кривая (траектория). Катастрофа происходит в форме резкого изменения ψ при плавном изменении параметров *a.* В случае div $v<0$ (для диссипативных систем) при $t\to\infty$ все фазовые траектории будут сходиться к некоторому компактному множеству в фазовом объеме, которое обычно и называется аттрактором динамической системы. Ситуация, однако, существенно меняется в случае описания распределенных нелинейных сред, которые обычно в значительной степени структурированы.

Заметим, что для большинства нелинейных систем обыкновенных дифференциальных уравнений арсенал средств их анализа весьма ограничен и почти ничего не удается сделать, кроме формулировки некоторых утверждений общего характера. В этом случае становится важным отыскание стационарных решений (неподвижных точек) и исследование поведения решений этой нелинейной системы уравнений вблизи этих точек. Фундаментальная теорема Гробмана—Хартмана [Гукенхеймер, Холмс, 2002] в теории динамических систем определяет условие, когда поведение этой системы может быть сведено к соответствующей задаче для линеаризованной системы.

Таким образом, описание переходов в системах (в частности, приближающегося изменения состояния системы), зависящих от нескольких параметров, удается дать лишь для сравнительно простого и ограниченного класса объектов, который и рассматривает теория катастроф. Весьма важно, что эволюция процессов, объектов и подсистем в литосфере, в которой источники энергии распределены по всей среде, как известно, не может быть реализована вне рамок автоволновых процессов, являющихся пространственно-временными структурами. Изучение явлений в таких средах, часто называемых активными, — весьма сложная задача. Общей теории активных сред не существует, а каждый новый достаточно проработанный пример активной среды, как правило, дает примеры новых типов динамики и самоорганизации, динамических режимов и бифуркаций.

Тем не менее установлено, что развитие катастрофических событий в таких системах оказывается возможным лишь при согласованном поведении различных частей, объектов или под.-систем.

Как известно, при описании возникновения и эволюции пространственно-временных структур в нелинейных средах в последние десятилетия обозначился значительный интерес к многокомпонентным системам уравнений типа «реакция—диффузия»:

$$U_t = \frac{\partial}{\partial x}\left(D(\mathbf{u})\frac{\partial}{\partial x}u \right) + F(\mathbf{u}), \qquad (5)$$

где **u** — вектор состояния элементарного объема возбудимой среды, $F(\mathbf{u})$ — векторная функция, $D(\mathbf{u})$ — матрица диффузии [Васильев и др., 1987]. При этом для описания возникновения структур функция $F(\mathbf{u})$ должна быть нелинейной. Сложность состоит в том, что в общем случае эти системы имеют пространственно-локализованные, неподвижные сложнодвижущиеся решения. Математическая сторона проблемы весьма сложна: как правило, нелинейные уравнения или их системы имеют больше, чем один тип решений, и на передний план здесь обычно выходят качественные методы исследований.

Спонтанный сейсмоэлектромагнетизм и переходные процессы. Актуальная задача современной геодинамики и прогноза — поиск методов диагностики типа исследуемой геосистемы, обнаружение эффектов регулярного и шумового воздействия на эту активную (возбудимую) геосистему, которые бы позволили диагностировать ее динамику и прогнозировать ее эволюцию на основе экспериментальных данных. Как уже неоднократно подчеркивалось, сложность использования с этой целью стандартных подходов состоит, вообще говоря, в том, что аттракторы, странные аттракторы, другие особенности пространства состояний системы, в том числе и более сложные, в случае многомерного фазового пространства как «седло—фокус», сепаратрисные инвариантные многообразия и другие весьма экзотические математические объекты, которые позволяют характе-

ризовать возможные типы ее поведения, в реальности, на практике, оказываются ненаблюдаемыми [Руманов, 2013]. Кроме того, мнение о том, что все, представляющие интерес геосистемы со временем неизбежно переходят в состояния, описываемые аттракторами, вообще говоря, закрывают или существенно ограничивают возможности моделирования сложных переходных состояний геосреды, поскольку они опираются на требования о стационарности и сбалансированности энергомассопотоков, пронизывающих ее, и симметрии связей между ее элементами и подсистемами [Зеленый, Милованов, 2004]. С этой точки зрения ныне весьма популярная парадигма современной нелинейной динамики — парадигма СОК, также не является универсальным (в силу ее сингулярного характера) подходом к решению проблемы. В то же время нелинейная динамика сложных систем предоставила такие универсальные признаки приближающегося сильного события, как аномальный рост флуктуаций и так называемое критическое замедление (эффект резонанса на нулевой частоте), удлинение шкалы времен релаксации, формирования зон «затишья», эффекты синхронизации и формирования диссипативных структур — цугов медленных деформационных фронтов и ряд других эффектов и явлений, которые могут быть обнаружены экспериментально путем прямых измерений. При этом спонтанные эмиссии различной физической природы литосферного происхождения, являющиеся непосредственным результатом и отражением собственной переходной активности геосреды, спектр которых отражает стадию этой эволюции, обладающие характерным поведением при приближении к катастрофе и выходе из нее, неизбежно оказываются в центре внимания мониторинга и выбора физически обоснованных параметров слежения.

На передний план выходят вопросы синтеза геоэлектромагнетизма, спонтанного сейсмоэлектромагнетизма и нелинейной динамики активных распределенных систем с диссипацией, теории переходов пространственных образов и обусловленных ими процессов генерации спонтанных эмиссий литосферного происхождения, формирования концептуальных основ мони-

торинга, прогноза и прогнозируемости геосистем. При таком подходе мониторинг и прогноз оказываются в статусе проблем физики. Некоторым избранным ее аспектам посвящены предыдущие публикации автора [Шуман, 2014б,в, 2015б].

Аттрактор системы с шумом и новая парадигма прогноза. Как уже отмечалось, имеются фундаментальные основания для физического рассмотрения литосферы как пространственно-структурированной, многомасштабной открытой системы с нелинейной динамикой. В то же время она не является самодостаточной. Можно также утверждать, что помимо внутренних системных флуктуаций она постоянно подвергается внешним периодическим и случайным воздействиям. Очевидно, в этом случае поведение геосистемы является случайным, и мы имеем дело со стохастическим или «зашумленным» аттрактором, границы которого в фазовом пространстве строго не определены [Анищенко и др., 2010].

Как известно, к классу случайных динамических систем относят системы, задаваемые векторным дифференциальным уравнением, правая часть которого зависит от некоторого случайного, возможно многокомпонентного воздействия $\xi(t)$:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{F}\left(\mathbf{x}, \xi\left(t\right), \alpha\right),\ \mathbf{x};\ \xi\left(t\right) \in R^N .$$

В настоящее время термин «странный аттрактор» приобрел некий собирательный смысл — его использование означает хаотичность изучаемой системы. Аналитических же результатов, касающихся их существования, относительно мало [Лоскутов, 2010].

Ввиду сложности описания хаотических систем при их изучении, особенно экспериментальном, обычно ограничиваются обработкой регистрируемых сигналов, генерируемых системой, хотя это и налагает определенные ограничения на возможности их реконструкции. Идея состоит в том, что геометрическую картину структуры странного аттрактора можно получить на основе лишь скалярного временного ряда — массива из N чисел, представляющих собой значения некоторой динамичес-

кой переменной $x(t)$, зарегистрированной с постоянным шагом τ по времени. Обычно такой сигнал и, соответственно, временной ряд называется наблюдаемым, а метод исследования — реконструкцией динамических систем. Впервые этот метод математически был обоснован Ф. Такенсом [Лоскутов, 2010].

Заметим, что в условиях отсутствия внешнего шума фазовая траектория будет принадлежать, в зависимости от начальных условий, тому или иному аттрактору. Ситуация кардинально изменяется при его наличии, что ведет к случайным переключениям между соответствующими аттракторами, статистика которых будет определяться свойствами шума и динамической системы [Анищенко и др., 1999]. И в этом проблема, поскольку литосфера не является самодостаточной системой.

Яркий пример особой роли шума в нелинейных системах — эффект стохастического резонанса, под которым понимают группу явлений, при которых отклик нелинейной системы на слабый внешний сигнал заметно усиливается с ростом интенсивности шума в системе [Анищенко и др., 1999]. При этом существует некий оптимальный уровень интенсивности шума, при котором периодическая компонента сигнала усиливается максимально. Следовательно, шум может контролировать один из характерных временных масштабов в системы. И что не менее важно, стохастический резонанс может выступать в качестве фундаментального порогового эффекта в случае, когда сумма регулярной (периодической) и шумовой компонент внешнего воздействия достигают и пересекают некий заданный порог возбудимой системы C_p, а именно: $\left[B \sin \omega t + \xi(t) \right] \geq C_p$.

При отсутствии шума амплитуда сигнала B недостаточна для достижения им пересечения порога возбудимости, а с его добавлением преодоление порога становится возможным и происходит случайным образом (триггерный эффект), реализуется кризис. Важный нелинейный эффект, сопровождающий эффект стохастического резонанса, — синхронизация стохастических систем как внешняя, так и взаимная [Анищенко и др., 1999]. Заметим, что достаточно шума любой интенсивности,

чтобы в ансамбле подсистем анализируемой системы наблюдался эффект стохастического резонанса.

Один из важнейших нелинейных эффектов, сопутствующих стохастическому резонансу, — синхронизация стохастических систем, не имеющих собственных периодических составляющих во временных реализациях процесса [Анищенко и др., 1999]. При этом, если принять традиционную точку зрения, разделяющую флуктуации, генерируемые системой, и внешние воздействия, возможны эффекты как внешней, так и внутренней стохастической синхронизации.

Очевидно, стохастическая динамика геосистем может быть ассоциирована с особенностями энергомассопотока из низов литосферы и внешними воздействиями. При этом синхронизация, как известно, является одним из возможных механизмов самоорганизации в нелинейных системах. При этом одно из главных достижений теории хаотических динамических систем заключается в том, что, исследуя временные ряды наблюдаемых, всегда можно отличить случайное стохастическое поведение системы от детерминированного хаоса, определить горизонт прогноза и в отдельных случаях предсказать дальнейшую эволюцию системы [Лоскутов, 2010].

Разумеется, в системах с хаосом глобальный прогноз невозможен. В то же время оказывается возможным новое направление или концепция локального прогноза, основанная в общем случае на анализе динамики геосистем, возбуждаемых одновременно неким сигналом различной структуры и внешним или внутренним, произведенным самой системой, шумом заданной статистики. Этот шум в реальной системе, вообще говоря, не является белым и его статистика обычно неизвестна. Однако при приближении к точке бифуркации корреляционное время пульсаций заведомо превышает корреляционное время шума и поэтому любой шум выглядит как белый (δ-коррелированный).

Нарастание низкочастотных мягких мод при приближении к точке бифуркации стационарного режима сложной системы является универсальным свойством. Формируется максимум, точнее, резонанс на нулевой частоте [Руманов, 2013].

В более расширенной постановке, очевидно, задача локального прогноза может быть сформулирована как задача исследования отклика конкретной геосистемы на многочастотные спонтанные, генерируемые системой, внешние шумы и сигналы (воздействия) различной (в том числе и периодической) структуры. Однако в такой постановке она сопряжена с постановкой как активного, так и пассивного мониторинга [Шуман, 2014в; 2015а, б].

Резонанс на нулевой частоте и фликкер-шум. Как уже упоминалось, именно структура шума может дать принципиально новые возможности диагностики динамики и строения геосистем. В частности, критерием близости стационарного режима активной системы, диссипативные потери в которой компенсируются потоками энергии извне, является резкий рост ее восприимчивости и, соответственно, нарастание низкочастотных мод в спектре ее шумов (формируется резонанс на нулевой частоте) [Руманов, 2013].

Восприимчивость стационарного режима, далекого от равновесия, определяется отношением амплитуд изменения в системе, подверженной малой синусоидальной добавке к постоянному воздействию, и воздействия. При приближении параметров системы к точке бифуркации происходит рост восприимчивости, преимущественно ее низкочастотной части из-за роста времени релаксации. Формируется резонанс на нулевой частоте [Руманов, 2013]. Сложность, однако, состоит в том, что в качестве неотъемлемой особенности систем, находящихся вдали от термодинамического равновесия, проявляются флуктуации, спектр мощности которых расходится на низких частотах по степенному закону $1/f^{\beta}$. Это явление получило название фликкер-шума [Бочков, Кузовлев, 1983, 2013; Коган, 1985; Кузовлев, 2015]. Именно вездесущность $1/f$-шума оказала решающее влияние на введение Баком, Тангом и Визенфельдом концепции СОК [Bak et al., 1987]. Однако, несмотря на усилия теоретиков, общей теории, охватывающей все расходимости спектра типа $1/f^{\beta}$, обнаруживаемые экспериментально в различных распределенных системах, в том числе и геосистемах, нет. Теория $1/f$-

шума сильно осложнена тем, что он имеет статистику, чуждую закону больших чисел. Предполагается обычно, что 1/*f*-шум или фликкер-шум имеет динамическую природу и представляет собой пространственно-временную когерентную структуру. Он рассматривается как результат процессов, протекающих в системах, состоящих из большого числа элементов и подсистем, способных поглощать, накапливать и высвобождать энергию. Существует точка зрения, что перемежаемость как непрерывный переход от регулярной динамики к хаотической позволяет дать универсальное объяснение его происхождения в нелинейных системах.

Другой подход к решению проблемы фликкер-шума связывают со стохастическими процессами, характерными для автоколебательных систем [Бочков, Кузовлев, 1983]. С формальной точки зрения описание фликкер-шума оказывается близким к описанию «режимов с обострением», характерным для решений многих нелинейных уравнений второго порядка или их систем параболического типа. Согласно Ю. Климонтовичу [Климонтович, 2002], предложена так называемая диффузионная теория фликкер-шума.

Оставляя за рамками данного рассмотрения другие точки зрения на проблему 1/*f*-шума, заметим лишь, что чисто стохастическое устройство мира (без 1/*f*-шума), при котором все может быть усреднено, было бы весьма обедненным и, возможно, унылым. Но как отличить фликкер-шум, постоянно присутствующий в реальных системах, от низкочастотного максимума шумов на низких частотах, связанного с ростом восприимчивости системы при приближении системы к моменту бифуркации? Согласно публикации [Руманов, 2013], этот максимум исчезает при удалении параметров системы от точки бифуркации.

В теоретическом плане связь спектральной плотности флуктуаций в системе с их диссипативными свойствами задается известной флуктационно-диссипативной теоремой физики. Смысл в том, что механизм любой диссипации является одновременно и механизмом рождения флуктуаций [Кадомцев, 1994; Бочков, Кузовлев, 2013].

На практике обычно разделяют быстрые флуктуации (белый шум ($P(f) \sim f^0$) и низкочастотные, чьи спектры мощности $P(f)$ соответствуют степенной функции: розовый или фликкер-шум ($P(f) \sim f^{-1}$), коричневый ($P(f) \sim f^{-2}$) и черный шум ($P(f) \sim f^{-3}$). Цвет шума на низких частотах рассматривается в качестве индикатора близости системы к состоянию СОК или степени ее «предельности»: преобладание розовых тонов (оттенков) указывает на пребывание системы в предельном неравновесном (квази) стационарном состоянии, соответствующим СОК [Зеленый, Милованов, 2004].

Очевидно, исследование низкочастотных спектров флуктуаций и шумов в природных геосистемах — одна из актуальных ближайших задач современной сейсмологии. В частности, исследование цветности шумов в спектре спонтанных флуктуаций — сейсмических, сейсмоакустических и электромагнитных — могло бы расширить представления о процессах в земной коре.

Реально $1/f$-шум, как правило, достаточно слаб, однако он может возрастать в неоднородных (неупорядоченных) средах, существенно превышать белый на низких частотах спектра и оказаться в этом случае определяющим.

О парадоксе формирования очаговых зон. В последние годы экспериментально обнаружен ряд существенных особенностей в процессах подготовки и реализации сейсмических событий, традиционно трактуемых в рамках накопления и последующей релаксации в земной коре высоких тектонических напряжений. В частности, по итогам тектонофизической реконструкции распределения напряжений в ряде сейсмоактивных регионов установлено, что большая плотность очагов сейсмических событий, в том числе и особо сильных, не совпадает с областями максимальных уровней напряжений, а располагается в большинстве случаев в областях их умеренных значений, соседствующих с зонами больших градиентов этих напряжений [Гуфельд, 2007; Ребецкий, 2007; Родкин и др., 2009; Пантелеев и др., 2013; Гуфельд, Новоселов, 2014 и др.]. При этом именно области градиента напряжений связывались с областями метаста-

бильного состояния, а его (градиента) наличие является определяющим фактором крупномасштабного хрупкого разрушения [Ребецкий, 2007].

Очевидно, в рамках классических представлений механики разрушения, согласно которым разрушение в твердом теле происходит в условиях достижения максимальных (предельных) нагрузок, переход к крупномасштабному разрыву происходит лишь при достижении критической плотности трещин. Решение проблемы виделось, с одной стороны, в особой блоковой структуре литосферы, в которой происходит воспроизводство структур разрушения и их последующее новое разрушение в граничных структурах [Гуфельд и др., 2011], с другой — в рамках смены старой парадигмы описание пластической деформации и разрушение твердых тел на новую концепцию многоуровневого описания деформируемого твердого тела как нелинейной иерархически организованной системы. В ней также подчеркивается определяющая роль дефектов среды того или иного масштабного уровня как физических носителей механизмов неупругого деформирования и разрушения [Панин и др., 2012; Макаров, 2012]. В русле этих идей предпринимались попытки построения модели подготовки потенциальных очагов сильных сейсмических событий как результата и итога эволюции дефектов геосреды на различных масштабных уровнях [Пантелеев и др., 2013]. Тем не менее, ряд важных проблем многоуровневой самоорганизации и учета нелинейности в иерархически организованной блоковой среде все еще ждут своего решения, в частности физики разрушения и формирования, прочности и пластичности, физики фазовых превращений и др.

Одно из распространенных объяснений малости сейсмогенных напряжений (или даже отсутствия проблемы накопления предельных напряжений вообще) основывается на связи сейсмичности с развитием реакций дегидратации горных пород, процессами твердотельных превращений вещества тектоносферы [Родкин и др., 2009], или с водородной дегазацией и процессами взаимодействия восходящих потоков водорода и гелия с ее твердой фазой, контролирующей основные парамет-

ры структуры блоков и сейсмический процесс в межблоковых структурах [Гуфельд и др., 2011]. В этой связи на передний план выходят работы по изучению так называемого «барьерного эффекта» дегазации, процессов разгрузки среды природными газами, расслоенности слабонагруженного поверхностного слоя земной коры, процессов в граничных межблоковых структурах, позволяющих с единых позиций подойти к истолкованию процессов подготовки очаговых зон крупных сейсмических событий и природы микросейсмического шума [Гуфельд, 2011; Гуфельд и др., 2011]. При этом эксперимент определенно демонстрирует влияние неоднородностей и структурных факторов литосферы, причем учет многомасштабной иерархической природы процессов разрушения становится критически важным.

Обратим внимание на попытки формализации результатов наблюдений, предпринятых на основе введения представлений о спектре дефектов материала среды как потенциальных очагов разрушения, характеризуемых различным уровнем напряжений, необходимых для их активации [Каннель и др., 2007]. Ключевой элемент такого подхода — формирование волн разрушения (сетки трещин, инициируемых под действием приложенных напряжений). Волна разрушения является примером самоподдерживающегося разрушения при сжатии. Их формирование является одним из важных механизмов катастрофической потери прочности твердых хрупких материалов, слагающих земную кору, и представляет собой пример нелокальной реакции среды на нагрузку [Каннель и др., 2007]. Эти волны формируются при напряжениях сжатия выше некоторого порога (порога разрушения). Весьма любопытно, что в волне разрушения происходит релаксация сдвиговых напряжений, в то время как трещины могут образовываться в беспористой среде только под действием растягивающих напряжений. Но, как известно, в неоднородной среде (а геосреда — существенно неоднородный объект на разных масштабных уровнях от микроскопического до регионального) даже при общем сжатии локальные напряжения вблизи неоднородностей могут стать растягивающими.

Очевидно, это принципиально важный результат для понимания механизма формирования очаговых зон, в частности крупномасштабных разрывов и воспроизводства структур разрушения, способный оживить и сделать более содержательной дискуссию по обсуждаемым вопросам. В итоге можно говорить об известном прогрессе в понимании процессов формирования крупномасштабных структур разрушения в земной коре, снятии ряда противоречий в трактовке самого сейсмического процесса, его феноменологическом описании и моделировании. Однако обнадеживающие результаты могут быть получены лишь при соответствующей организации и проведении мониторинговых наблюдений с учетом многомасштабной иерархической природы процессов разрушения. При этом важный результат — решение уравнений механики деформируемых твердых тел, полученных в рамках физической мезомеханики и нелинейной динамики (по существу, уравнений матфизики, являющихся физически обоснованными моделями этих процессов), содержит все основные особенности эволюционных процессов, известных ранее как из наблюдений, так и из решений базовых уравнений нелинейной динамики.

Заключение. В статье предпринята попытка рассмотрения некоторых аспектов современного состояния исследований в области теории сложных нелинейных динамических систем, находящихся вдали от термодинамического равновесия, актуальных с точки зрения сейсмологии и сейсмоэлектромагнетизма. Очевидно, нетрадиционность задач в этих областях современной геофизики связана с формированием нового направления в области нелинейной динамики весьма общего характера — теории активных (возбудимых) сред с конечным порогом неустойчивости и обладающих способностью к пространственно-временной самоорганизации, имеющей непосредственное отношение к самоорганизации в геосистемах. Достаточно широко распространена точка зрения об автоволновых механизмах самоорганизации в таких средах. В этом контексте геодинамика может рассматриваться как раздел теории динамических систем, формирования, поддержания и преобразования автострук-

тур в геосреде, пронизываемой потоками энергии и вещества из земных недр.

Нетрадиционность задач современной геодинамической теории в первую очередь связана с анализом механизмов пространственно-временной локализации и формирования автоструктур, их пространственному саморазвитию, превращению структур в другие под влиянием изменений параметров среды. При этом в зависимости от параметров геосистемы, в частности пространственных и временных масштабов изменений диффузионных потоков, в ней может реализовываться жесткий или мягкий режим возбуждения автоструктур. В случае мягкого режима образуются структуры малой амплитуды, формируется геометрический шум — сейсмический и сейсмоэлекторомагнитный. Однако слабая сейсмичность и сейсмоэлектромагнитная активность не могут быть единственным проявлением эффектов воздействия энергомассопотоков из земных недр.

В случае жесткого режима возбуждения происходит скачкообразное возникновение автоструктур большой амплитуды, их трансформация в диссипативные структуры с обострением в условиях качественной смены типа метастабильности при определенных критических значениях параметра структурного скейлинга. Особенность диссипативных структур обострения — их резонансная природа. При этом форшоки, майнфоки и афтершоки также связывают с трансформацией автоволновых структур большой амплитуды в диссипативные структуры с обострением.

В расширенной постановке задачи прогноза и прогнозируемости это, вообще говоря, в известном смысле синтез идей нелинейной динамики с концепцией переходного рассеяния в нестационарной геосреде. В более улитарном, прикладном смысле, новая концепция или парадигма прогноза может быть сформулирована в качестве задачи исследования отклика геосистемы на многочастотные флуктуации и шумы различной природы (внешнего и внутреннего происхождения). В принципе, он может быть реализован по временному, пространственному или пространственно-временному срезу самоорганизации. Растет

понимание важности влияния шумов на характер развития геодинамических процессов и формирование состояния геосистем, выявления эффектов шумового и регулярного воздействия на активную (возбудимую) геосреду, на основании которых возможна диагностика ее типа по экспериментальным данным.

В последние годы интенсивно развиваются новые направления в нелинейной динамике, посвященные проблемам предсказуемости хаотических систем. При этом основное внимание концентрировалось на исследованиях прогнозируемости в системах, демонстрирующих СОК — сингулярного неравновесного квазистационарного состояния, для достижения которого необходимо, чтобы все вынуждающие действия на систему были как можно более медленными.

Показано, что определяющими факторами и особенностями неравновесного критического поведения рассматриваемых активных систем являются критическое замедление времени релаксации и аномально большие времена корреляции различных состояний системы, приводящие в конечном итоге к реализации динамического скейлингового поведения. Такие системы способны генерировать и формировать различные, в том числе и хаотические пространственно-временные структуры активности, представляющие собой импульсы и фронты возбуждения, неустойчивость которых ведет к установлению в системе самоподдерживающихся колебаний определенной пространственной конфигурации, причем каждый из элементов или под.-систем генерирует последовательность импульсов возбуждения с различным интервалом следования. Эти фронты возбуждений, очевидно, и являются наиболее энергетически активными и значимыми источниками спонтанных эмиссий. Заметим, что в качестве одного из основных физических механизмов их генерации может служить переходное фрактальное рассеяние фронтов различной природы, возникающих в среде в процессе эволюции автоволновых структур. Эти спонтанные эмиссии также обладают ярко выраженными свойствами нелинейных процессов, способностью к периодической самоорганизации и хаоти-

зации, характерному поведению при приближении к точке бифуркации (катастрофе) и выходе из нее.

Таким образом, спонтанные эмиссии — это результат и отражение эволюции, трансформации автоструктур или ансамблей автоструктур, образование автоволн и стационарных уединенных состояний (автосостояний), а ведущий физический механизм их генерации — переходное рассеивание.

Ключевые динамические объекты, способные перевести моделирование геосистем на новый уровень — метастабильность и устойчивые переходы. При этом динамический анализ метастабильных состояний и диссипативных структур или паттернов означает формирование нового направления динамической сейсмологии. Однако задачи теории переходов пространственных образов (автоструктур) оказываются значительно более сложными, чем классические задачи теории бифуркаций динамических систем: метастабильным образом в фазовом пространстве системы отвечают уже не аттракторы, а переходные множества траекторий.

Очевидно, имеются весомые основания утверждать, что существующие в настоящее время подходы к описанию сейсмического процесса в качестве задачи механики разрушения твердого тела, общей физической концепции СОК и ее модификаций, статистической модели (ETAS) или более общей модели нелинейного мультипликативного каскада (МНМК) [Родкин и др., 2016] носят весьма частный характер. В то же время прогнозные свойства геосистем с СОК продолжают оставаться в центре дискуссии о прогнозе и прогнозируемости сейсмичности, формирования очагов сейсмических событий и других актуальных вопросов сейсмологии.

Несомненно, решение этих вопросов требует более общих подходов, новых моделей и методов исследований и, что не менее важно, адекватных образов и понятий, общих для неравновесных сред произвольной природы. В частности, нелинейная динамика способствовала появлению новой трактовки и нового понимания сейсмического процесса как результата устойчивой переходной активности геосреды, ее метастабильных состоя-

ний и последовательности таких метастабильных состояний, время существования которых достаточно велико. При этом основная идея состоит в том, чтобы описать сейсмичность в рамках ее пространственно-временной трактовки в терминах автоколебаний и автоструктур. Важным является изучение синхронизации автоколебаний и влияние шумов на синхронизацию, в частности пространственно-временных шумов. Получили развитие методы диагностики синхронизации хаоса в динамике взаимодействующих автоколебательных систем, основанные на вейвлет-преобразовании сигналов [Павлов, Анищенко, 2007]. Примечательно, что эти идеи и подходы в последнее время оказались в центре дискуссий о возможности прогноза сильных сейсмических событий. Примечательно, что в русле этих идей оказались исследования А. Любушина по поиску возможных предвестников таких событий — эффектов увеличения синхронизации (когерентного поведения) скалярных компонент многомерных временных рядов систем мониторинга (обнаружения скрытых признаков роста синхронизации сейсмических шумов). Однако пока не существует какой-либо единой и последовательной теории возникновения пространственно-временного хаоса. Остаются открытыми такие вопросы, как, к примеру, что такое пространственно-временной хаос в динамике геосистем, какую роль в его проявлениях играют структуры, как соотносятся между собой пространственный и временной хаос, каковы его характеристики и как они связаны с динамикой подсистем и особенностями взаимодействий между ними, их конкуренцией (подавлением одних колебательных мод другими и синхронизацией (координацией) во времени)? Остается нерешенным ряд вопросов слабого хаоса как ключевого условия сохранения литосферы. В столь достаточно сложной и неопределенной ситуации кажется очевидным, что хаос как фактор обновления организации системы, механизм выхода на одну из возможных тенденций ее развития и способ сохранения ее целостности, оказывается тесно связанным с вопросами прогнозируемости и прогноза ее динамики. Вопрос состоит в том, как многомасштабные многочастотные флуктуации и шумы

внешнего и внутреннего происхождения изменяют состояния и другие характеристики системы. Ответ на этот вопрос является ключевым для понимания эволюции геосистем. Заметим, однако, что реальные геосистемы, как правило, существенно структурированы, среднестатистическое среднее не может обеспечить необходимой среднестатистической количественной оценки их реакции на эти воздействия. Очевидно также, что попытки решения вопросов прогнозируемости и прогноза динамики геосистем в рамках адекватности природы сейсмичности модели детерминированного хаоса и СОК как сингулярного явления весьма дискуссионны и носят весьма ограниченный характер. Здесь мы все еще остаемся в русле идей и представлений нелинейной динамики конца 70-х — начала 80-х годов прошлого века. Остаются ощутимыми и заметными следы и последствия очарования идеями теории катастроф, распознавания образов, основанных на эмпирических признаках, статистическими методами, базирующимися на допущениях, которые сводят исследуемую геосистему к гауссовой стационарной среде. Мы все еще ориентированы, по образному выражению Ф. Дайсона, на изучение «кочек болота, на котором мы живем» [Дайсон, 2010]. Не исключено и весьма вероятно, что эти идеи в известном смысле лишь отвлекали геофизиков от действительно актуальных тем, хотя и были естественными для своего времени.

Предельно ясно, что для описания геосистем необходимы новые идеи и подходы. Осторожно можно сказать так, что в последние годы уже появились такие идеи и экспериментальные возможности решения упомянутых проблем прогноза и прогнозируемости. По меньшей мере, это — задача, которая решается в отдельных, возможно уникальных случаях, но не поддающаяся решению с помощью универсального, единого и достаточно простого алгоритма, хотя, ввиду ее сложности, его может и не быть. Становится понятным и скрытый смысл вопроса: почему дискуссии о предсказуемости сейсмических событий [Кособоков, 2004] столь противоречивы и даже бессодержательны? Тем не менее достичь фундаментального понимания проблемы все еще не удается, хотя полезные и необходимые обобщения,

вероятно, могут быть достигнуты на пути использования методов дробной динамики — мощного аналитического аппарата, адекватного сложным нелинейным системам с многомасштабными корреляциями и в пространстве, и во времени. При этом перспективность и обоснованность дробно-дифференциального подхода основывается на таких взаимосвязанных положениях, как автомодельность, степенной закон релаксации, устойчивые распределения, дробно-дифференциальные уравнения [Зеленый, Милованов, 2004; Сибатов, Учайкин, 2009]. Соответственно, поле спонтанных эмиссий, формируемое активной геосредой, в известном смысле может быть истолковано в качестве «связности» внутренних степеней свободы формирования и эволюции автоструктур. При этом важный класс собственных динамических степеней свободы, согласованных с фрактальной геометрией геосреды, образуют фрактонные колебательные возбуждения или фрактоны, отражающие связи между структурными свойствами геосреды и процессами в ней, протекающими на различных пространственно-временных масштабах [Шуман, 2016].

Список литературы

Абдуллаев С. С., Заславский Г. М. Классическая нелинейная динамика и хаос лучей в задачах распространения волн в неоднородных средах. *Успехи физ. наук.* 1991. Т. 161. № 8. С. 2—43.

Авагимов А. А., Зейгарник В. А., Николаев А. В., Соболев Г. А., Пономарев А. В., Тарасов Н. Т., Новиков В. А., Тарасова Н. В., Челидзе Т. Г. Влияние электромагнитных воздействий на сейсмический режим. *Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов. Второй международный симпозиум: Тез. докл.* Бишкек, 2002. С. 178—179.

Авагимов А. А., Зейгарник В. А., Файнберг Э. Б. О пространственно-временной структуре сейсмичности, вызванной электромагнитным воздействием. *Физика Земли*. 2005. № 6. С. 55—65.

Агранович В. М., Гинзбург В. Л. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов. Москва: Наука, 1979. 432 с.

Адушкин В. В., Локтев Д. Н., Спивак А. А. Влияние барических возмущений атмосферы на микросейсмические процессы в земной коре. *Физика Земли*. 2008. № 6. С. 77—85.

Адушкин В. В., Спивак А. А. Приповерхностная геофизика: комплексные исследования литосферно-атмосферных взаимодействий в окружающей среде. *Физика Земли*. 2012. № 3. С. 3—21.

Айзенбер-Степаненко М. В., Шер Е. Н. Моделирование волновых явлений в структурированных средах. *Физ. мезомеханика*. 2007. Т. 10. № 1. С. 47—57.

Альшиц В. И., Любимов В. Н. Обобщение приближения Леонтовича для электромагнитных полей на границе диэлектрик — металл. *Успехи физ. наук.* 2009. Т. 179. № 8. С. 865—871.

Анищенко В. С. Детерминированный хаос. *Соровский образовательный журн*. 1997. № 6. С. 70—76.

Анищенко В. С., Астахов С. В. Теория возвратов Пуанкаре и ее приложения к задачам нелинейной физики. *Успехи физ. наук.* 2013. Т. 183. № 10. С. 1009—1028.

Анищенко В. С., Вадивасова Т. Е., Стрелкова Г. И. Автоколебания динамических и стохастических систем и их математический образ — аттрактор. *Нелинейная динамика*. 2010. Т. 6. № 1. С. 107—126.

Анищенко В. С., Нейман А. Б., Мосс Ф., Шиманский-Гайер Л. Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения степени порядка. *Успехи физ. наук.* 1999. Т. 169. № 1. С. 7—38.

Арнольд В. И. Что такое математическая физика? *Успехи физ. наук.* 2004. Т. 174. № 2. С. 1381—1382.

Ахромеева Т., Курдюмов С., Малинецкий Г., Самарский А. Структуры и хаос в нелинейных средах. Москва: Физматлит, 2007. 488 с.

Бак П. Как работает природа: теория самоорганизованной критичности. Москва: Либроком, 2014. 276 с.

Бак П., Чен К. Самоорганизованная критичность. *В мире науки*. 1991. № 3. С. 16—24.

Балханов В. К., Башкуев Ю. Б. Распространение электромагнитных волн во фрактальных средах. 2007. https://www.medem.kiev.ua/page.php?pid=511.

Балханов В. К., Башкуев Ю. Б., Ангархаева Л. Х. Фрактальные спектральные характеристики скин-слоя и модуля поверхностного импеданса. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2009. № 4. С. 45—48.

Безручко Б. П., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., Смирнов Д. А., Тасс П. А. Моделирование и диагностика взаимодействия нелинейных колебательных систем по хаотическим временным рядам. *Успехи физ. наук.* 2008. Т. 178. № 3. С. 323—329.

Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-однородных сред. Москва: Недра, 1991. 250 с.

Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И. Модели и методы магнитотеллурики. Москва: Научный мир, 2009. 680 с.

Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И., Новиков Д. Б., Пастуцан В. В. Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. Москва: Диалог МГУ, 1997. 161 с.

Биргер Б. И. Неустановившаяся ползучесть и ее роль в геодинамике. *Физика Земли*. 2012. № 6. С. 34—42.

Богданов Ю. А. К проблематике распространения возмущений в геологических средах: краткий обзор актуальных источников и конструктивные соображения. *Геофиз. журн*. 2008. Т. 30. № 1. С. 96—110.

Богданов Ю. А., Бондаренко Н. В., Захаров И. Г., Лойко Н. П., Лукин В. В., Черняков А. М., Чертов О. Р. Аппаратурно-методическое обеспечение метода анализа спонтанной электромагнитной эмиссии Земли. *Геофиз. журн*. 2009а. Т. 31. № 4. С. 34—43.

Богданов Ю. А., Воронин В. И., Уваров В. Н., Черняков А. М. Электромагнитное проявление структуры недр. *Геофиз. журн*. 2003. Т. 25. № 4. С. 117—124.

Богданов Ю. А., Коболев В. П., Русаков О. М., Захаров И. Г. Геополяритонное зондирование газоносных структур северо-западного шель-

фа Черного моря. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2007. Т. 22. № 4. С. 37—61.

Богданов Ю. А., Коболев В. П., Шуман В. Н. Вариации сейсмоэлектромагнитного фона Земли и сейсмическая активность. *Геофиз. журн*. 2009б. Т. 31. № 3. С. 95—106.

Богданов Ю. А., Павлович В. Н. Неравновесное излучение земной коры — индикатор геодинамических процессов. *Геофиз. журн*. 2008. Т. 30. № 4. С. 12—24.

Богданов Ю. А., Павлович В. Н., Шуман В. Н. Спонтанная электромагнитная эмиссия литосферы: состояние проблемы и математические модели. *Геофиз. журн*. 2009в. Т. 31. № 4. С. 20—33.

Боголюбов А. Н., Потапов А. А., Рехвиашвили С. М. Способ введения дробного интегро-дифференцирования в классической электродинамике. *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика и аэрономия*. 2009. № 4. С. 9—15.

Богомолов Л. М. Отклик эмиссионных сигналов геосреды на воздействия электромагнитных полей и вибраций: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2012. 44 с.

Болотов В. Н. Обобщенная функция Кантора и переходное фрактальное рассеяние. *Журн. техн. физики*. 2002. Т. 72. Вып. 2. С. 8—15.

Болотов В. Н. Переходное фрактальное излучение. *Электромагнитные явления*. 1998. Т. 1. № 1. С. 74—77.

Болотовский Б. М., Серов А. Б. Особенности поля переходного излучения. *Успехи физ. наук.* 2009. Т. 179. № 5. С. 517—524.

Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Москва: Наука, 1970. 718 с.

Бочков Г. Н., Кузовлев Ю. Е. Новое в исследованиях 1/f-шума. *Успехи физ. наук.* 1983. Т. 141. № 1. С. 151—176.

Бочков Г. Н., Кузовлев Ю. Е. Флуктуационно-диссипативные соотношения. *Успехи физ. наук.* 2013. Т. 183. № 6. С. 617—631.

Бредов М. М., Румянцев В. В., Топтыгин И. Н. Классическая электродинамика: Учебное пособие. Под ред. И. Н. Топтыгина. Москва: Наука, 1985. 400 с.

Бучаченко А. Л. Магнитопластичность и физика землетрясений. Можно ли предотвратить катастрофу? *Успехи физ. наук.* 2014. Т. 184. № 1. С. 101—108.

Бучаченко А. Л., Ораевский В. Н., Похотелов О. А., Сорокин В. Н., Страхов В. Н., Чмырев В. Н. Ионосферные предвестники землетрясений. *Успехи физ. наук.* 1996. Т. 166. № 9. С. 1023—1029.

Ванштейн Л. А. Распространение импульсов. *Успехи физ. наук.* 1976. Т. 118. № 2. С. 339—367.

Васильев А. Н., Гайдуков Ю. П. Электромагнитное возбуждение звука в металлах. *Успехи физ. наук.* 1983. Т. 141. № 3. С. 431—467.

Васильев А. Н., Романовский Ю. М., Яхно В. Г. Автоволновые процессы в распределенных кинетических системах. *Успехи физ. наук.* 1979. Т. 128. № 4. С. 625—666.

Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2003. 150 с.

Виноградов А. П. К вопросу о форме материальных уравнений в электродинамике. *Успехи физ. наук.* 2002. Т. 172. № 3. С. 363—370.

Виноградов Е. А., Дорофеев И. А. Термостимулированные электромагнитные поля твердых тел. *Успехи физ. наук.* 2009. Т. 179. № 5. С. 449—485.

Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П. Теория волн. Москва: Наука, 1979. 383 с.

Вол А., Гилат А. Л. Первичные водород и гелий как источники энергии землетрясений. В кн.: *Генезис углеводородных флюидов и месторождений*. Москва: ГЕОС, 2006. С. 160—166.

Вторая Международная конференция «Новые технологии обработки и использования данных дистанционного зондирования Земли в геологоразведочных работах и при ведении мониторинга опасных геологических процессов» ФГУП ВСЕГЕИ, 2014. vsegei.ru/ru/conf/summary.

Габийяр Р., Декок Г., Уэйт Дж. Р. Радиосвязь между подземными и подводными пунктами. *Зарубежная радиоэлектроника*. 1972. № 12. С. 16—34.

Гапонов-Грехов А. В., Рабинович М. И. Нелинейная динамика неравновесных сред: структуры и турбулентность. *Успехи физ. наук.* 1987а. Т. 152. № 1. С. 159—162.

Гапонов-Грехов А. В., Рабинович М. И. Автоструктуры. Хаотическая динамика ансамблей. В сб.: *Нелинейные волны. Структуры и бифуркации*. Москва: Наука, 1987б. С. 7—47.

Гаркавый Н. Н., Левицкий Л. С., Гайдакова Т. А., Трапезников Ю. А., Фридман А. М. О выявлении трех компонент в сейсмической активности Земли. *Физика Земли*. 1994. № 10. С. 23—32.

Геншафт Ю. С. Земля — открытая система: геологические и геофизические следствия. *Физика Земли*. 2009. № 8. С. 4—12.

Герцик В. М. Физические представления о разрушении и прогноз вероятностей сильных землетрясений. *Физика Земли*. 2008. № 3. С. 22—39.

Гийон Э., Митеску К. Д., Юлен Ж.-П., Ру С. Фракталы и перколяция в пористой среде. *Успехи физ. наук.* 1991. Т. 161. № 10. С. 121—128.

Гинзбург В. Л. О законах сохранения энергии и импульса при излучении электромагнитных волн (фотонов) в среде и тензоре энер-

гии-импульса в микросейсмической электродинамике поля. *Успехи физ. наук*. 1973. Т. 10. № 2. С. 308—319.

Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. Москва: Наука, 1967. 683 с.

Гинзбург В. Л., Цытович В. Н Переходное излучение и переходное рассеяние (некоторые вопросы теории). Москва: Наука, 1984. 360 с.

Голицин Г. С. О распределении числа литосферных плит по размерам. *Физика Земли*. 2008. № 3. С. 3—8.

Гололобов Д. В., Москвичев В. Н., Стадник Ю. Н. Аналитическое и экспериментальное исследование взаимодействия электромагнитных волн с углеводородными залежами. *Геология нефти и газа*. 1995. № 3. С. 26—30.

Голубков А. А., Макаров В. А. Граничные условия для электромагнитного поля на поверхности сред со слабой пространственной дисперсией. *Успехи физ. наук*. 1995. Т. 165. № 3. С. 339—346.

Гольдин С. В. Дилатансия, переупаковка, землетрясения. *Физика Земли*. 2004. № 10. С. 37—54.

Гольдин С. В. Преобразование и восстановление разрывов в задачах томографического типа. Новосибирск: Изд. Ин-та геологии и геофизики СО АН СССР, 1988. 100 с.

Горбатиков А. В., Степанова М. Ю. Результаты исследований статистических характеристик и свойств стационарности низкочастотных микросейсмических сигналов. *Физика Земли*. 2008. № 1. С. 57—67.

Горбатиков А. В., Собисевич А. А., Собисевич А. Е, Степанова М. Ю., Овсюченко А. Н. Технология глубинного зондирования земной коры с использованием естественного низкочастотного микросейсмического поля. В кн.: *Изменение окружающей среды и климата. Т. 1. Сейсмические процессы и катастрофы*. Москва: ИФЗРАН, 2008. С. 223—236.

Горный В. И., Тронин А. А. Обзор достижений последнего десятилетия в области применения спутниковых методов дистанционного зондирования при геологических и геофизических исследованиях. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 5. С. 116—132.

Гохберг М. Б., Гуфельд И. Л., Гершензон Н.И., Пилипенко В.А. Электромагнитные эффекты при разрушении земной коры. *Известия АН СССР. Физика Земли*. 1985. № 1. С. 72—87.

Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Аронов Е. Л. О высокочастотном электромагнитном излучении при сейсмической активности. *Докл. АН СССР*. 1979. Т. 248. № 5. С. 1077—1081.

Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Похотелов О. А. Сейсмоэлектромагнитные явления. Москва: Наука, 1988. 174 с.

Грицунов А. В. К расчету энергии и импульса распределенной электромагнитной колебательной системы. *Радиотехника.* 2008. Вып. 155. С. 288—298.

Гроза А. А. Теоретические основы и методологические принципы кинематических методов электромагнитных зондирований земной коры импульсными источниками: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Киев: ИГФ НАНУ, 1985. 36 с.

Гукенхеймер Дж., Холмс Ф. Нелинейные колебания динамические системы и бифуркации векторных полей. Москва; Ижевск: Изд. Ин-та компьютерных исследований, 2002. 560 с.

Гульельми А. В. Инерционные эффекты в коре и в магнитосфере земли. *Физика Земли*. 2008. № 1. С. 50—56.

Гульельми А. В. К 70-летию формулировки граничного условия Леонтовича (отклик на статью Альшица В. И. и Любимова В. Н. «Обобщение приближения Леонтовича для электромагнитных полей на границе диэлектрик—металл»). *Успехи физ. наук.* 2010. Т. 130. № 1. С. 105—106.

Гульельми А. В. О граничном условии Леонтовича в геоэлектромагнетизме. *Физика Земли*. 2009а. № 9. С. 12—15.

Гульельми А. В. О фиктивной нелинейности поверхностного импеданса земной коры. *Письма в ЖЭТФ*. 2009б. Т. 89. Вып. 7. С. 439—442.

Гульельми А. В. Ультранизкочастотные волны в коре и в магнитосфере Земли. *Успехи физ. наук.* 2007. Т. 177. № 12. С. 1257—1276.

Гульельми А. В. Уравнение генерации сейсмомагнитных сигналов. *Докл. РАН*. 1995. Т. 342. № 3. С. 390—392.

Гульельми А. В. Форшоки и афтершоки сильных землетрясений в свете теории катастроф. *Успехи физ. Наук.* 2015. Т. 185. № 4. С. 415—429.

Гульельми А. В., Левшенко В. Т. Электромагнитные сигналы от землетрясений. *Физика Земли*. 1994. № 5. С. 65—70.

Гульельми А. В., Собисевич Л. Е., Собисевич А. Л., Лавров И. П. О форшоках сильных землетрясений. *Физика Земли*. 2014. № 4. С. 43—49.

Гуфельд И. Л. Возможен ли прогноз сильных коровых землетрясений? *Вестник РАН*. 2013а. Т. 83. № 3. С. 236—245.

Гуфельд И. Л. О глубинной дегазации и структуре литосферы и верхней мантии. *Электронный журнал «Глубинная нефть»*. 2013б. Т. 1. № 2. С. 172—188.

Гуфельд И. Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Королев: ЦНИИМаш, 2007. 160 с.

Гуфельд И. Л., Гусев Г. А., Собисевич А. Л. Правомерна ли постановка работ по предотвращению сильных коровых землетрясений? *Урал. геофиз. вестник.* 2005. № 7. С. 5—15.

Гуфельд И. Л., Матвеева М. И. Барьерный эффект дегазации и деструкция Земной коры. *Докл. РАН.* 2011. Т. 438. № 2. С. 253—257.

Гуфельд И. Л., Матвеева М. И., Новоселов О. Н. Почему мы не можем осуществить прогноз сильных коровых землетрясений. *Геодинамика и тектонофизика.* 2011. Т. 2. № 4. С. 378—415.

Гуфельд И. Л., Новоселов О. Н. Сейсмический процесс в зоне субдукции. Мониторинг фонового режима. Москва: Изд. МГУЛ, 2014. 100 с.

Давидович М. В. О законах сохранения энергии и импульса электромагнитного поля в среде и при дифракции на проводящей пластине. *Успехи физ. наук.* 2010. Т. 80. № 6. С. 623—638.

Давыдов В. А., Зыков В. С., Михайлов А. С. Кинематика автоволновых структур в возбудимых средах. *Успехи физ. наук.* 1991. Т. 161. № 8. С. 45—86.

Дайсон Ф. Птицы и лягушки в математике и физике. *Успехи физ. наук.* 2010. Т. 180. № 8. С. 859—870.

Даниленко В. А. Автомодельні ударні хвилі в геосередовищах з просторовою нелокальністю. *Геоінформатика.* 2010. № 2. С. 39—45.

Даниленко В. А. К теории движения блочно-иерархических геофизических сред. *Докл. АН Украины.* 1992. № 2. С. 87—90.

Дещерский А. В., Лукк А. А., Сидорин А. Я. О новой парадигме прогноза землетрясений. *Докл. РАН.* 2003. Т. 388. № 2. С. 233—236.

Джексон Дж. Классическая электродинамика. Москва: Мир, 1965. 420 с.

Дидык Р. П., Кузнецов Е. В. Анализ влияния на деформационное поведение металлов и их сплавов в пластической области. *Доп. НАН України.* 2008. № 1. С. 49—55.

Дмитриев В. И., Бердичевский М. Н. Обобщенная модель импеданса. *Физика Земли.* 2002. № 10. С. 106—112.

Дмитриевский А. Н. Автоволновые процессы формирования флюидонасыщенных зон Земли: *Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы. Материалы Всерос. конф. (Москва, 22— 25 апреля 2008 г.).* Москва: ГЕОС, 2008. С. 6—8.

Дмитриевский А. Н., Володин И. А. Автосолитонные механизмы дегазации Земли: *Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы. Материалы Всерос. конф. (Москва, 22— 25 апреля 2008 г.).* Москва: ГЕОС, 2008. С. 152—154.

Дмитриевский А. Н., Володин И. А. Формирование и динамика энергоактивных зон в геологической среде. *Докл. РАН*. 2006. Т. 411. № 3. С. 395—399.

Добровольский И. П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. Москва: Физматлит, 2009. 240 с.

Дода Л. Н., Степанов И. В., Натяганов В. Л. Эмпирическая схема краткосрочного прогноза землетрясений. *Докл. РАН*. 2013. Т. 453. № 5. С. 551—553.

Дремин И. М., Иванов О. В., Нечитайло В. А. Вейвлеты и их использование. *Успехи физ. наук*. 2001. Т. 171. № 5. С. 465—501.

Дубовиков М. М., Старченко Н. В. Эконофизика и фрактальный анализ временных рядов. *Успехи физ. наук*. 2011. Т. 181. № 7. С. 779—786.

Дубровский В. А., Сергеев В. Н. Кратко- и среднесрочные предвестники землетрясений как проявление нестабильности скольжения вдоль разломов. *Физика Земли*. 2006. № 10. С. 11—18.

Дурандин А. В. Структурно-тектонический анализ данных дистанционного зондирования Земли. *Геоматика*. 2011. № 1. С. 48—51.

Елькин Ю. Е Автоволновые процессы. Математическая биология и биоинформатика. 2006. Т. 1. Вып. 1. С. 27—40.

Ершов С. В., Новик О. Б. Сейсмогидроэлектромагнетизм — физика предвестников цунами. *Геофизика 21-го столетия: 2007 г. Сб. трудов девятых геофизических чтений им. В.В. Федынского (1—3 марта 2007 г. Москва).* Тверь: ООО «Изд-во ГЕРС», 2008. С. 65—75.

Ершов С. В., Новик О. Б., Ружин Ю. А. Электромагнитные сигналы деформационных процессов под дном океана. 2010. http://www.mivgu.ru/conf/murom2010/section4/23.

Есипов И. Б., Рыбак С. А., Серебряный А. Н. Нелинейная акустическая диагностика земных пород и океана. *Успехи физ. наук*. 2006. Т. 176. № 1. С. 102—108.

Журков С. Н. Кинетическая концепция разрушения твердых тел. *Вестник АН СССР*. 1968. № 3. С. 46—52.

Журков С. Н., Куксенко В. С., Савельев В. Н., Султанов У. О прогнозировании разрушения горных пород. *Известия АН СССР. Физика Земли*. 1977. № 6. С. 11—18.

Зайцев В. Ю., Назаров В. Е., Таланов В. И. «Неклассические» проявления микроструктурно обусловленной нелинейности — новые возможности для акустической диагностики. *Успехи физ. наук*. 2006. Т. 176. № 1. С. 97—102.

Закржевская Н. А., Соболев Г. А. О возможном влиянии магнитных бурь на сейсмичность. *Физика Земли*. 2002. № 4. С. 3—15.

Захаров В. С. Самоподобие структур и процессов в литосфере по результатам фрактального и динамического анализа: Автореф. дис. ... д-ра геол.- мин. наук. Москва, 2014. 35 с.

Зеленый Л. М., Милованов А. В. Фрактальная топология и странная кинетика: от теории перколяции к проблемам космической электродинамики. *Успехи физ. наук.* 2004. Т. 174. № 8. С. 810—850.

Зилитинкевич С. С. Самоорганизация и нелокальная природа геофизической турбулентности и планетарных пограничных слоев. *Геофиз. журн.* 2010. Т. 32. № 6. С. 169—174.

Зосимов В. В., Лямшев Л. М. Фракталы в волновых процессах. *Успехи физ. наук.* 1995. Т. 165. № 4. С. 362—402.

Зуев Л. Б. Электрические поля и пластичность кристаллов. *Соросовский образовательный журн.* 1998. http://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/633.html.

Изаков М. Н. Самоорганизация и информация на планетах и в экосистемах. *Успехи физ. наук.* 1997. Т. 167. № 10. С. 1087—1094.

Ильинский Ю. А., Келдыш Л. В. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом. Москва: Изд-во МГУ, 1989. 304 с.

Исаев Г. А., Филатов В. В. О физико-математических принципах визуализации неустановившихся электромагнитных полей. *Геология и геофизика.* 1981. № 6. С. 89—95.

Иудин Д. И. Фрактальная динамика активных систем: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 2005. 30 с.

Каганов М. И., Васильев А. Н. Электромагнитноакустическое преобразование — результат действия поверхностной силы. *Успехи физ. наук.* 1993. Т. 163. № 10. С. 67—80.

Кадомцев Б.Б. Динамика и информация. *Успехи физ. наук.* 1994. Т. 164. № 5. С. 449—530.

Калинин А. В., Владов М. А., Золотая А. А., Кульчицкий Л. М., Старовойтов А. В., Токарев М. Ю., Хмелевской В. К., Шапаева Н. В. Современная георадиолокация. *Разведка и охрана недр.* 2001. № 3. С. 2—6.

Каменецкий Ф. М. Высокоразрешающая электроразведка: факт или реклама. *Геофизика.* 1999. № 1. С. 41—44.

Каннель Г. И., Фортов В. Е., Разоренов С. В. Ударные волны в физике конденсированного состояния. *Успехи физ. наук.* 2007. Т. 177. № 8. С. 809—830.

Кернер Б. С., Осипов В. В. Автосолитоны. *Успехи физ. наук.* 1989. Т. 157. № 2. С. 201—261.

Кинг Р., Смит Г. Антенны в материальных средах. Москва: Мир, 1984. 822 с.

Киселев Е. С., Ларионов Е. И., Сафонов А. С. Электрические свойства нефтегазоносных разрезов. Поисковые признаки залежей углеводородов в методах высокоразрешающей электроразведки. Москва: Научный мир, 2007. 172 с.

Кисин И. Г. Явление самоорганизации при взаимодействии флюидных потоков и геодинамических процессов в земной коре. *Геофизика XXI столетия: 2007 г. Сб. трудов девятых геофизических чтений им. В. В. Федынского (1—3 марта 2007 г., Москва).* Тверь: ООО «Изд-во ГЕРС», 2008. С. 82—88.

Кишкина С. Б., Спивак А. А. Проявление резонансных свойств земной коры в микросейсмических колебаниях. *Докл. РАН.* 2003. Т. 392. № 4. С. 543—545.

Климонтович Ю. Л. Введение в физику открытых систем. Москва: Янус-К, 2002. 240 с.

Климонтович Ю. Л. Что такое стохастическая фильтрация и стохастический резонанс. *Успехи физ. наук.* 1999. Т. 169. № 1. С. 39—47.

Климонтович Ю. Л. Энтропия и информация открытых систем. *Успехи физ. наук.* 1999. Т. 169. № 4. С. 443—452.

Клиньшов В. В., Некоркин В. И. Синхронизация автоколебательных с запаздывающими связями. *Успехи физ. наук.* 2013. Т. 183. № 12. С. 1323—1336.

Кляцкин В. И. Современные методы статистического описания динамических стохастических систем. *Успехи физ. наук.* 2009. Т. 179. № 5. С. 547—553.

Князева Е. Н., Курдюмов С. П. Синергическое расширение антропного принципа. В кн.: *Синергическая парадигма*. Москва: Прогресс, 2000. С. 80—106.

Коболев В. П. Дослідно-методична комплексна геолого-геофізична експедиція 66-го рейсу НДС «Професор Водяницький» в західній частині Чорного моря. *Геолог України*. 2011. № 1. С. 40—62.

Коган М. И. Низкочастотный токовый шум со спектром типа $1/f$ в твердых телах. *Успехи физ. наук.* 1985. Т. 143. № 2. С. 285—326.

Колесниченко А. В. Синергетический подход к описанию стационарно-неравновесной турбулентности астрогеофизических систем. Препринт. Институт прикладной математики РАН. Москва, 2003.

Колесников А. А. Фоновая акустическая регуляция физико-химических процессов в конденсированных системах: Автореф. дис. ... д-ра хим. наук. Санкт-Петербург, 2009. 38 с.

Комаров В. А. Электромагнитноакустическое преобразование — метод неразрушающего контроля. *Успехи физ. наук.* 1986. Т. 150. № 1. С. 164—166.

Конторович В. М., Глуцюк А. М. Преобразование звуковых и электромагнитных волн на границе проводника в магнитном поле. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1961. Т. 41. Вып. 4. С. 1195—1204.

Копытов В. В. Исследование эффекта перемежаемости в системах связанных нелинейных осцилляторов. *Журнал радиоэлектроники*. 2003. № 3. 5 с.

Короновский Н., Наймарк А. Землетрясения: возможен ли прогноз. *Наука и жизнь*. 2013. № 3. С. 37—43.

Короновский Н., Наймарк А. Непредсказуемость землетрясений как фундаментальное следствие нелинейности геодинамических систем. *Вестник Моск. ун-та. Сер. 4.* 2012. № 6. С. 3—11.

Кособоков В. Г. Прогноз землетрясений и геодинамические процессы. Ч. 1. Прогноз землетрясений: основы, реализация, перспективы. Вычислительная сейсмология, вып. 36. Москва: ГЕОС, 2005. 172 с.

Кособоков В. Г. Теоретическая база и алгоритмы прогноза землетрясений на основе предвестников активизации сейсмичности: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2004. 32 с.

Кравцов Ю. А. Случайность, детерминированность, предсказуемость. *Успехи физ. наук*. 1989. Т. 158. № 1. С. 93—121.

Кравцов Ю. А., Орлов Ю. И. Границы применимости геометрической оптики и смежные вопросы. *Успехи физ. наук*. 1980. Т. 132. № 3. С. 475—496.

Кравченко В. Я. Электромагнитное возбуждение звука в металлической пластине. *Журнал экспериментальной и теоретической физики.* 1968. Т. 54. Вып. 5. С. 1494—1509.

Кувшинов А. В. Электромагнитная индукция в сферических моделях Земли с трехмерным распределением электропроводности: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2004. 42 с.

Кузелев М. В., Рухадзе А. А. К вопросу о расплывании импульсов в диссипативных и неравновесных средах. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1979. Т. 22. № 10. С. 1223—1229.

Кузнецов О. Л. Эффект АНЧАР — предвестник новой философии геофизической разведки. *Междунар. университет «Дубна». Сб. тр*. 2009. С. 7—8.

Кузнецов С. Н. Динамический хаос и однородно гиперболические аттракторы: от математики к физике. *Успехи физ. наук*. 2011. Т. 181. № 2. С. 121—148.

Кузовлев Ю. Е. Почему природе нужен 1/f шум. *Успехи физ. наук*. 2015. Т. 185. № 7. С. 773—783.

Кузьмин Ю. О. Деформационные автоволны вразломных зонах. *Физика Земли*. 2012. № 1. С. 3—19.

Курант Р. Уравнения с частными производными. Москва: Мир, 1964. 830 с.

Ланда П. С. Трубецков Д. И., Гусев В. А. Заблуждения и реальность в некоторых задачах физики (теория и эксперимент). *Успехи физ. наук*. 2009. Т. 179. № 3. С. 255—277.

Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. Ч. 1. Москва: Наука, 1976. 584 с.

Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. Ч. 2. Москва: Наука, 1978.

Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. Москва: Наука, 1959. 532 с.

Ларкина В. И., Мигулин В. В, Сергеева Н. Г., Сенин Б. В. Исследование динамики литосферы по спутниковым измерениям электромагнитного излучения. *Вестник МГТУ*. 2001. Т. 4. Вып. 1. С. 115—120.

Лебедь Т. В., Савченко А. С. Модель глубинного строения Донецкого складчатого сооружения и прилегающих структур по данным региональных геофизических наблюдений. *Геофиз. журн*. 2009. Т. 31. № 4. С. 44—68.

Левин Б. В, Родкин М. В., Тихонов И. Н. Великое Японское землетрясение. *Природа*. 2011. № 10. С. 14—22.

Левшенко В. Т. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы литосферного происхождения: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат.наук. Москва: ОИФЗ РАН, 1995. 36 с.

Летников Ф. А. Синергетические аспекты геологического развития Земли. *Изв. Томск. политехн. ун-та.* 2011. Т. 319. № 1. С. 6—11.

Липеровский В. А. Физические модели связи в системе литосфера—атмосфера—ионосфера. *Лекции БШФФ*. 2006. С. 58—65.

Лоскутов А. Ю. Динамический хаос. Системы классической механики. *Успехи физ. наук*. 2007. Т. 177. № 9. С. 989—1015.

Лоскутов А. Ю. Очарование хаоса. *Успехи физ. наук*. 2010. Т. 180. № 12. С. 1305—1329.

Лоскутов А. Ю., Михайлов А.С. Основы теории сложных систем. Москва; Ижевск: Изд. Ин-та компьютерных исследований, 2007. 620 с.

Лоскутов Е. М. Эмпирическая реконструкция динамических систем: построение и оптимизация прогностических моделей: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 2013.

Лукк А. А, Дещерский А. В., Сидорин А. Я., Сидорин И. А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. Москва: Изд. ОИФЗ РАН, 1996. 210 с.

Любушин А. А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. Москва: Изд. ИФЗ РАН, 2007. 228 с.

Любушин А. А. Карта свойств низкочастотных микросейм для оценки сейсмической опасности. *Физика Земли*. 2013. № 6. С. 11—20.

Любушин А. А Прогноз Великого Японского землетрясения и сингулярности сейсмического шума. 2011а. http://www.seismicweather.com/down loard/russian nature journal.pdf.

Любушин А. А. Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 года. Долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсмам. *Геофизические процессы и биосфера*. 2011б. Т. 10. № 1. С. 9—35.

Макарец Н. В., Анахов Г. В. Механизмы формирования сейсмоэлектрического эффекта. *Геофиз. журн*. 2008. Т. 30. № 6. С. 133—140.

Макаров Н. В. Возможности современных методов геомеханического моделирования в приложении к задачам наук о Земле. Москва: Изд. МФЗ РАН, 2012. 14 с.

Макаров П. В Самоорганизованная критичность деформируемых твердых тел и сред и перспективы прогноза разрушения. *Материалы международной конференции «Современные проблемы прикладной математики механики: теория, эксперимент и практика», посвященной 90-летию со дня рождения акад. Н. Н. Яненко. Новосибирск, 30 мая — 4 июня 2011 г.*

Малинецкий Г. Г. Хаос: тупики, парадоксы, надежды. *Компьютеры*. 1998. № 47. http://www.cplire.ru/rus/InformChaosLab/chaoscomputerra/Malinetskii.html.

Малинецкий Г. Г., Курдюмов С. П. Нелинейная динамика и проблемы прогноза. *Вестник РАН*. 2001. Т. 71. № 3. С. 210—224.

Мальцев С. А., Моргунов В. А. К физической модели возмущений электростатического поля литосферной природы в атмосфере и ЭМИ. *Физика Земли*. 2005. № 9. С. 65—73.

Манин Ю. И. Математика как метафора. Москва: Изд-во МЦНМО, 2008. 450 с.

Марков Г. Т., Васильев Е. Н. Математические методы прикладной электродинамики. Москва: Сов. радио, 1970. 118 с.

Марков П. В. Математическая теория эволюции нагружаемых твердых тел и сред. *Физическая мезомеханика*. 2008. Т. 11. № 3. С. 19—35.

Мартынов Г. А. Неравновесная статистическая механика, уравнения переноса и второе начало термодинамики. *Успехи физ. наук*. 1996. Т. 166. № 10. С. 1105—1133.

Мирзоев К. М., Николаев А. В., Лукк А. А., Юнга С. Л. Наведенная сейсмичность и возможности регулируемой разрядки накоплен-

ных тектонических напряжений в земной коре. *Физика Земли*. 2009. № 10. С. 49—68.

Могилатов В. С. Импульсная электроразведка. Новосибирск: Изд-во Новосибирск. гос. ун-та, 2002. 208 с.

Могилатов В. С., Балашов Б. П. Зондирование вертикальными токами. Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал «Гео», 2005. 207 с.

Монин А. С., Берестов А. А. Новое в климате. *Вестник РАН*. 2005. Т. 75. № 2. С. 126—131.

Москаленко О. И., Короновский А. А., Шурыгина С. А. Поведение нелинейных систем на границе синхронизации, индуцированной шумом. *Нелинейная динамика*. 2011. Т. 7. № 2. С. 197—208.

Москвичев В. Н. Исследование взаимодействия электромагнитных волн с углеводородной залежью. В кн.: *Радиотехника и электроника*. Вып. 18. Минск: Высшая школа, 1989. С. 91—96.

Мухамедов В. А. О фрактальных свойствах высокочастотного сейсмического шума и механизмах его генерации. *Физика Земли*. 1992. № 3. С. 39—49.

Мячкин В. И., Костров Б. В., Соболев Г. А., Шалина О. Г. Основы физики очага и предвестники землетрясений. В кн.: *Физика очага землетрясения*. Москва: Наука, 1975. С. 6—29.

Наймарк А. А., Захаров В. С. О соотношениях направленности, цикличности и нелинейности в геологических процессах. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2012. Вып. 19. № 1. С. 181—189.

Наймарк О. Б. Структурно-скейлинговые переходы и автомодельные закономерности развития землетрясений. *Физическая мезомеханика*. 2008. Т. 1. № 2. С. 89—106.

Национальный отчет Международной ассоциации сейсмологии и физики недр Земли Международного геодезического союза 2003—2006 гг. к XXIV Генеральной ассамблее МГГС. РАН, Национальный геофизический комитет. Москва, 2007. http://ngc.gcras.ru.

Небрат А. Г., Сочельников В. В. Электроразведка методом становления поля для поляризующихся сред. *Геофизика.* 1998. № 6. С. 27—30.

Некоркин В. И. Нелинейные колебания и волны в нейродинамике. *Успехи физ. наук*. 2008. Т. 178. № 3. С. 313—323.

Некоркин В. И., Безручко Б. П., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., Смирнов Д. А., Тасс П. А. Моделирование и диагностика взаимодействия нелинейных колебательных систем по хаотическим временным рядам (приложения в нейрофизиологии). *Успехи физ. наук*. 2008. Т. 178. № 3. С. 323—329.

Некут А. Г., Спис Б. Р. Использование электромагнитных методов с контролируемым источником при разведке нефтяных месторож-

дений. *Труды Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (ТИИЭР)*. 1989. Т. 77. № 2. С. 57—85.

Неновски П. И., Бойчев Б. В. Механизмы возникновения сейсмоэлектрических сигналов в земной коре. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2004. Т. 44. № 4. С. 545—553.

Нигматуллин Р. Р. Дробный интеграл и его физическая интерпретация. *Теоретическая и математическая физика*. 1992. Т. 90. № 3. С. 354—368.

Нигматуллин Р. Р., Рябов Я. Е. Диэлектрическая релаксация типа Коула—Девидсона и самоподобный процесс релаксации. *Физика твердого тела*. 1997. Т. 39. № 1. С. 101—105.

Николаев А. В. Инициирование землетрясений подземными ядерными взрывами. *Вестник РАН*. 1993. Т. 63. № 2. С. 113—116.

Николаев А. В. О возможности искусственной разрядки тектонических напряжений с помощью электрических и сейсмических воздействий. *Двойные технологии*. 1999. № 2. С. 6—10.

Николаев А. В. Развитие методов нелинейной геофизики. *Электронный научно-информационный журнал «Вестник ОГГГГ РАН»*, 2002. № 1.

Николаев А. В., Троицкий ПА, Чеботарева И.Я. Изучение литосферы сейсмическими шумами. *Докл. АН СССР*. 1986. Т. 282. № 9. С. 586—591.

Николаев А. В., Алексеев А. С., Цибульчик Г. М., Яновская Г. Б., Сурнев В. Б. Проблемы геотомографии. Москва: Наука, 1997. 331 с.

Николаевский В. Н. Очаг землетрясения — события и предвестники удара. В сб.: *Экстремальные природные явления и катастрофы*. Т. 2. Москва: Изд-во РАН, 2011. С. 316—330.

Павлов А. Н., Анищенко В. С. Мультифрактальный анализ сложных сигналов. *Успехи физ. наук*. 2007. Т. 177. № 8. С. 859—870.

Паламарчук В. К., Кирейтов В. Р. Проблемы информационного обеспечения и построения системы ближнего прогноза землетрясений. Международный институт нелинейных исследований. Сибирское отделение. WebGround01.06.2010.

Пальшин Н. А. Проблемы электромагнитных зонди-рований на акваториях. *Геофиз. журн*. 2009. Т. 31. № 4. С. 78—92.

Панин В. Е., Егорушкин В. Е., Панин А. В. Нелинейные волновые процессы в деформируемом твердом теле как многоуровневой иерархически организованной системе. *Успехи физ. наук*. 2012. Т. 182. № 12. С. 1351—1357.

Пантелеев И. А. Масштабно-инвариантные закономерности разрушения горных пород и развитие сейсмических событий: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Пермь, 2010. 24 с.

Пантелеев И. А., Плехов О. А., Наймарк О. Б. Модель геосреды с дефектами: коллективные эффекты развития несплошностей при формировании потенциальных очагов землетрясений. *Геодинамика и тектонофизика*. 2013. Т. 4. № 1. С. 37—51.

Пантелеев И. А., Плехов О. А., Наймарк О. Б. Нелинейная динамика структур обострения в ансамблях дефектов как механизм формирования очагов землетрясений. *Физика Земли*. 2012. № 6. С. 43—55.

Пикельнер С. Б. Основы космической электродинамики. Москва: Наука, 1966. 407 с.

Пилипенко В. А. Волновые геомагнитные поля в космосе и на Земле. www.kosmofizika.ru/owz/pilipenko/plp1pdf.

Платман Ф., Вольф П. Волны и взаимодействие в плазме твердого тела. Москва: Мир, 1975. 438 с.

Пономарева Е. А., Седых П. А. Как разрешить проблему суббурь? *Геомагнетизм и аэрономия*. 2006. Т. 46. № 4. С. 560—575.

Потапов А. А. Современное состояние радиофизических применений фракталов, дробных операторов и скейлинга. *Сб. докладов III Всерос. конф. «Радиолокация и радиосвязь» ИРЭ РАН, 26 —30 октября 2009 г.* Москва: ИРЭ РАН, 2009. С. 842—876.

Потапов А. А. Фракталы в дистанционном зондировании. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2000. № 6. С. 3—65.

Псахье С. Г. Многоуровневый подход к моделированию процессов деформации и разрушения. *Вестник РАН*. 2013. Т. 83. № 5. С. 398—406.

Пулинец С. А., Узунов Д. Спутниковым технологиям нет альтернативы. *О проблеме мониторинга природных и техногенных катастроф: Труды Ин-та прикладной геофизики им. акад. Е. К. Федорова*. Вып. 89. Москва, 2011. С. 173—185.

Пулинец С. А., Узунов Д., Карелин А. В., Боярчук К. А., Тертышников А. В., Юдин И. А. Единая концепция обнаружения признаков готовящегося сильного землетрясения в рамках комплексной системы литосфера—атмосфера—ионосфера — магнитосфера. *Космонавтика и ракетостроение*. 2012. № 3. С. 21—31.

Рабинович М. И. Пути возникновения и свойства стохастичности диссипативных систем. *Успехи физ. наук*. 1983. Т. 139. С. 363.

Рабинович М. И., Мюезинолу М. К. Нелинейная динамика мозга: Эмоции и интеллектуальная деятельность. *Успехи физ. наук*. 2010. Т. 180. № 4. С. 371—387.

Рабинович М. И., Сущик М. М. Регуляторная и хаотическая динамика структур в течениях жидкости. *Успехи физ. наук*. 1990. Т. 160. № 1. С. 3—63.

Раутиан С. Г. Об отражении и преломлении на границе среды с отрицательной групповой скоростью. *Успехи физ. наук.* 2008. Т. 178. № 10. С. 1017—1024.

Ребецкий Ю.Л. Новые данные о природных напряжениях в области подготовки сильного землетрясения. Модель очага землетрясения. *Геофиз. журн.* 2007б. Т. 29. № 6. С. 96—115.

Ребецкий Ю. Л. Состояние и проблемы теорий прогноза землетрясений. Анализ основ с позиций детерминированного подхода. *Геофиз. журн.* 2007а. Т. 29. № 4. С. 102—120.

Родкин М. В. Катастрофы и цивилизации. Долгопрудный: Интеллект, 2016. 232 с.

Родкин М. В. Прогноз непредсказуемых катастроф. *Вокруг света.* 2008. № 6. С. 64—73.

Родкин М. В., Никитин А. Н., Васин Р. Н. Сейсмотектонические эффекты твердофазовых превращений в геоматериалах. Москва: ГЕОС, 2009. 199 с.

Родкин М. В, Писаренко В. Ф., Нго Тхи Лы, Рукавишникова Т. А. Теоретические подходы к описанию закона распределения сильнейших землетрясений. *EAGE Geoinformatics. Тез. докл.* Киев, 2015.

Руденко О. В. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики. *Успехи физ. наук.* 2006. Т. 176. №1. С. 77—95.

Рузмайкин А. Климат как игра случая. *Успехи физ. наук.* 2014. Т. 184. № 3. С. 297—311.

Руманов Э. Н. Критические явления вдали от равновесия. *Успехи физ. наук.* 2013. Т. 183. № 1. С. 103—112.

Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику. Москва: Наука, 1966. 360 с.

Садовский М. А. Геофизика и физика взрыва. Изб. тр. Москва: Наука, 2004. 440 с.

Садовский М. А., Болховитинов Л. Г., Писаренко В. Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. Москва: Наука, 1987. 100 с.

Садовский М. А., Писаренко В. Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. Москва: Наука, 1991. 95с.

Самарский А. А., Еленин Г. Г., Змитренко Н. В., Курдюмов С. Г. Торение нелинейной среды в виде сложных структур. *Докл. АН СССР.* 1977. Т. 237. № 6. С. 1330—1333.

Светов Б. С. Электродинамические основы квазистационарной геоэлектрики. Москва: Изд. Ин-та земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн АН СССР, 1984. 183 с.

Светов Б. С. О частотной дисперсии электрических свойств среды. *Физика Земли*. 1992. № 4. С. 62—70.

Светов Б. С. Основы геоэлектрики. Москва: Изд-во ЛКИ, 2008. 656 с.

Светов Б. С. Перспективы сейсмоэлектромагнитных исследований в новом столетии. В кн.: *Проблемы геофизики XXI века*: в 2-х кн. Кн. 2. Москва: Наука, 2003. С. 113—128.

Светов Б. С., Агеев В. В., Лебедева Н. А. Поляризуемость горных пород и феномен высокоразрешающей электроразведки. *Геофизика*. 1996. № 4. С. 42—52.

Сейсмическая томография. Под ред. Г. Нолета. Москва: Мир, 1990. 416 с.

Сибатов Р. Т., Учайкин В. В. Дробно-дифференциальный подход к описанию дисперсионного переноса в полупроводниках. *Успехи физ. наук*. 2009. Т. 179. № 10. С. 1079—1103.

Сидоренков В. В. Уравнения и характеристики распределения волн реального электромагнитного поля. http://www.refstru. com/2011.

Сидоренков В. В. Фундаментальные основы электродинамической теории нетеплового действия электромагнитного поля на материальные среды. *Вестн. Воронеж. техн. ун-та*. 2007. Т. 3. № 11. С. 75—82.

Сидорин А. Я. Выдающееся достижение Российской академии наук: успешный прогноз землетрясения в Японии 11 марта 2011 г. *Геофизические процессы и биосфера*. 2011. Т. 10. № 1. С. 5—8.

Скобельцын Д. В. О тензоре энергии-импульса электромагнитного поля. *Успехи физ. наук*. 1973. 10. № 2. С. 253—293.

Смирнов Б. М. Излучательные процессы с участием фрактальных структур. *Успехи физ. наук*. 1993. Т. 163. № 7. С. 50—63.

Смирнов В. Б., Пономарев А. В., Jiadong Q., Черепанцев А. С. Ритмы и детерминированный хаос в геофизических временных рядах. *Физика Земли*. 2005. № 6. С. 6—28.

Соболев Г. А., Закржевская Н. А., Харин Е. П. О связи сейсмичности с магнитными бурями. *Физика Земли*. 2001. № 11. С. 62—72.

Соболев Г. А., Пономарев А. В. Физика землетрясений и предвестники. Москва: Наука, 2003. 270 с.

Соболев Г. А., Пономарев А. В., Кольцов А. В., Круглов А. А., Луцкий В. А., Цывинская Ю. В. Влияние инжекции воды на акустическую эмиссию при долговременном эксперименте. *Геология и геофизика*. 2006. Т. 47. № 5. С. 608—621.

Соболев Г. А., Тарасов Н. Т., Тарасова Н. В., Закржевская Н. А., Гитис В. Г., Дерендеев А. Б. О взаимосвязи полей деформаций, сейсмичности и электромагнитных воздействий. Динамика физических полей Земли. Москва: Светоч Плюс, 2011. 312 с.

Солодуха А. М., Григорян Г. С. Степенные показатели релаксационных процессов в неоднородных диэлектриках. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2007. Т. 9. № 3. С. 263—265.

Состояние исследований по прогнозу землетрясений в Прибайкалье. 2013. Инновационно-внедренческий центр Ин-та земной коры СО РАН. Иркутск. in-vc.ru/tourism/prognoz. html.

Спивак А. А, Кишкина С. Б. Исследование микросейсмического фона с целью определения активных тектонических структур и геодинамических характеристик среды. *Физика Земли*. 2004. № 7. С. 35—49.

Спивак А. А., Кишкина С. Б., Харламов В. А. Прецессионные движения структурных блоков земной коры. *Докл. РАН*. 2009. Т. 426. № 6. С. 813—815.

Спивак Л. В. Синергетические эффекты деформационного отклика в термодинамически открытых системах металл—водород. *Успехи физ. наук*. 2008. Т. 178. № 9. С. 897—922.

Спицын В. И., Троицкий О. А. Электропластическая деформация металлов. Москва: Наука, 1985. 160 с.

Старостенко В. И., Даниленко В. А., Венгрович Д. Б., Кутас Р. И., Стифенсон Р. А., Столба С. Н. Моделирование эволюции осадочных бассейнов с учетом структуры природной среды и процессов самоорганизации. *Физика Земли*. 2001. № 12. С. 40—51.

Старостенко В. И., Лукин А. Е., Коболев В. П., Русаков О. М., Орлюк М. И., Шуман В. Н., Омельченко В. Д., Пашкевич И. К., Толкунов А. П., Богданов Ю. А., Буркинский И. Б., Лойко Н. П., Федотова И. Н., Захаров И. Г., Черняков А. М., Куприенко П. Я., Макаренко И. Б., Легостаева О. В., Лебедь Т. В., Савченко А. С. Модель глубинного строения Донецкого складчатого сооружения и прилегающих структур по данным региональных геофизических наблюдений. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 4. С. 44—68.

Стаховский И. Р. Самоподобная сейсмогенерирующая структура земной коры: обзор проблемы и математическая модель. *Физика Земли*. 2007. № 12. С. 35—47.

Страхов В. Н. К новой парадигме сейсмологии. *Природа*. 1989. № 12. С. 4—6.

Страхов В. Н., Савин М. Г. Об управлении сейсмической активностью. *Геофиз. журн*. 2013а. Т. 35. № 6. С. 3—9.

Страхов В.Н., Савин М.Г. О научных основах краткосрочного прогноза землетрясений. *Геофиз журн*. 2013б. Т. 35. № 2. С. 18—23.

Страхов В. Н., Савин М. Г. Уменьшение сейсмической опасности: упущенные возможности. *Геофиз. журн*. 2013в. Т. 35, № 1. С. 4—11.

Сурков В. В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. Москва: Изд. Моск. гос. инж.-физ. ин-та, 2000. 238 с.

Тараненко В. Б., Слексис С. П, Вайсс К. О. Пространственные резонаторные солитоны. В кн.: *Диссипативные солитоны*. Москва: Физматлит, 2008. С. 109—200.

Тарасов В. Е. Дробные интегро-дифференциальные уравнения для электромагнитных волн в диэлектрических средах. *Теоретическая и математическая физика*. 2009. Т. 158. № 3. С. 419—424.

Тарасов В. Е. Модели теоретической физики с интегро-дифференцированием дробного порядка: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2011. 31 с.

Тарасов Н. Т. Изменение сейсмической коры при электрическом воздействии. *Докл. РАН*. 1997. Т. 353. № 4. С. 542—545.

Тарасов Н. Т. Изменение сейсмического процесса при облучении коры мощными электромагнитными импульсами. *Электромагнитные исследования Земли. Материалы III Междунар. конф. по электромагнитным зондированиям Земли, 2—8 сентября 2007 г. Звенигород*. Москва: ИФЗ РАН, 2007. С. 124—137.

Тарасов Н. Т., Тарасова Н. В. Влияние ядерных взрывов на сейсмический режим. *Докл. РАН*. 1995. Т. 343. № 1. С. 543—546.

Тарасов Н. Т., Тарасова Н. В., Авагимов А. А. Влияние мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность. *Вулканология и сейсмология*. 1999. № 4-5. С. 152—160.

Тарасов Н. Т., Тарасова Н. В., Авагимов А. А., Зейгарник В. А. Изменение сейсмичности Бишкекского геодинамического полигона при электромагнитном воздействии. *Геология и геофизика*. 2001. Т. 42. № 10. С. 1641—1649.

Тимофеев А. В. Геометрическая оптика и явление дифракции. *Успехи физ. наук*. 2005. Т. 175. № 6. С. 637—641.

Тихонов А. Н. О распространении переменного электромагнитного поля в слоистой анизотропной среде. *Докл. АН СССР*. 1959. Т. 126. № 5. С. 967—969.

Трофименко С. В. Структура и динамика геофизических полей и сейсмических процессов в блоковой модели земной коры: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Томск, 2011. 36 с.

Турунтаев С. Б., Ворохобина С. В., Мельчаева О. Ю. Выявление техногенных изменений сейсмического режима при помощи методов нелинейной динамики. *Физика Земли*. 2012. № 3. С. 52—65.

Уломов В. И. О глобальных изменениях сейсмического режима и уровня водной поверхности Земли. *Физика Земли*. 2007. № 9. С. 3—17.

Уруцков И. И. О возможном механизме землетрясений. *Прикладная физика*. 2000. № 4. С. 55—61.

Уткин В. И., Юрков А. К. Радон как индикатор геодинамических процессов. *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 2. С. 277—286.

Уэйт Дж. Р. Геоэлектромагнетизм. Москва: Недра, 1987. 235 с.

Файнберг Э. Б., Авагимов А. А., Зейгарник В. А., Васильева Г. А. Генерация тепловых потоков в недрах Земли мировыми геомагнитными бурами. *Физика Земли*. 2004. № 4. С. 54—62.

Филатов В. В. Электродинамика гетерогенных сред в обратных задачах импульсной электроразведки (фрактальный подход и линеаризация): Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, 2002. 36 с.

Филатов В. В. Динамические системы и задачи прогноза: *Докл. конф. «Гео-Сибирь 2008»*. www.sscc/ru/Conf/ mmg2008/ papers.

Фрадков А. Л. О применении кибернетических методов в физике. *Успехи физ. наук*. 2005. Т. 175. № 2. С. 113—138.

Фридман А. М., Поляченко Е. В., Насырканов Н. Р. О некоторых корреляциях в сейсмодинамике и двух компонентах сейсмической активности Земли. *Успехи физ. наук*. 2010. Т. 180. № 3. С. 303—312.

Хаякава М., Коровкин Н. В. Сейсмоэлектромагнитные явления как новая область исследования радиоволновых явлений. *XII Всемирный электротехнический конгресс. ВЭЛК 2011. 4—5 октября 2011 г. Доклады и презентации.* http://www. ruscable.ru//article/report.

Хогоев Е. А., Колесников Ю. И. Применение сейсмоэмиссионной томографии для изучения геодинамики активных зон. *Технология сейсморазведки*. 2011. № 1. С. 59—65.

Хорган Дж. Конец науки: взгляд на ограниченность знания на закате века науки. Перевод с англ. СПб: Амфора, 2001. 479 с.

Худак Ю. И. О локальной структуре одного класса решений однородной системы уравнений Максвелла для изотропной среды. *Докл. АН СССР*. 1985. Т. 282. Вып. 1. С. 61—65.

Цифра И. М., Шуман В. Н. Параболические системы типа «реакция—диффузия» при моделировании процессов генерации и распространения электромагнитной эмиссии литосферы и методы их анализа. *Геофиз. журн*. 2010. Т. 32. № 5. С. 51—60.

Чеботарева И. Л. Новые алгоритмы эмиссионной томографии для пассивного сейсмического мониторинга разрабатываемых месторождений утлеводородов. Ч. 1: Алгоритмы обработки и численное моделирование. *Физика Земли*. 2010. № 3. С. 7—19; Ч. II: Результат обработки реальных данных. С. 20—36.

Чеботарева И. А. Структура и динамика геосреды в шумовых сейсмических полях. Методы и экспериментальные результаты: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2011. 56 с.

Чернавский Д. С., Старков Н. И., Малков С. Ю., Косе Ю. В., Щербаков А. В. Об эконофизике и ее месте в современной теоретической экономике. *Успехи физ. наук*. 2011. Т. 181. № 7. С. 767—773.

Черногор Л. Ф. Солнце—межпланетная среда—магнитосфера-ионосфера—атмосфера—Земля как открытая неравновесная нелинейная физическая система. *Журнал проблем эволюции открытых систем*. 2011. Вып.13. Т. 1. С. 22—48.

Черяука А. Б., Мартаков С. В. Численная имитация и анализ переходных электромагнитных процессов на ранних временах. *Геология и геофизика*. 1999. Т. 40. № 5. С. 774—784.

Четаев Д. Н. О поле низкочастотного электрического диполя, лежащего на поверхности однородного анизотропного полупространства. *Журнал технической физики*. 1962. Т. 32. № 11. С. 1342—1348.

Шаповал А. Б. Вопросы прогнозируемости в изотропных моделях с самоорганизованной критичностью: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2011. 35с.

Шаповал А. Б., Шнирман М. Г. Диссипативная детерминированная модель БТВ с активизационным сценарием сильных событий. *Физика Земли*. 2009а. № 5. С. 47—56.

Шаповал А. Б, Шнирман М. Г. Прогноз крупнейших событий в модели образования лавин с помощью предвестников землетрясений. *Физика Земли*. 2009б. № 5. С. 39—46.

Шаповал А. Б., Шнирман М. Г. Универсальность алгоритмического прогноза экстремальных событий временных рядов. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2011. № 4. С. 58—65

Шарыпов О. В. Детерминированный хаос и случайность. *Философия науки*. 2001. № 2. С. 71—84.

Шебалин П. Н., Воробьева И. А. Алгоритмы прогноза землетрясений. Вычислительная сейсмология, вып. 37. Москва: ГЕОС, 2006. 292 с.

Шерман С. И. Тектонофизический анализ сейсмического процесса в зонах активных разломов литосферы и проблема среднесрочного прогноза землетрясений. *Геофиз. журн*. 2005. Т. 27. № 1. С. 20—38

Шмидт А.В. Анализ систем реакция-диффузия методом нелинейных определяющих уравнений. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2007. Т. 47. № 2. С. 256—268.

Шуман В. Н. Высокочастотный спонтанный электромагнитный шум литосферы и томографические системы. *Геофиз. журн.* 2014а. Т. 36. № 1. С. 43—63.

Шуман В. Н. Геосреда и сейсмический процесс: проблемы управления. *Геофиз. журн*. 2011а. Т. 33. № 2. С. 16—27.

Шуман В. Н. Геосреда как открытая нелинейная диссипативная динамическая система — задачи идентификации, возможности управления, прогноз эволюции (обзор). *Геофиз. журн*. 2011б. Т. 33. № 5. С. 35—50.

Шуман В. Н. Дробная динамика и эмиссионная активность геосистем. *Геофиз. журн.* 2016а. Т. 38. № 3. С. 72—83.

Шуман В. Н. Классические модели и идея «сверхразрешения» в теории электромагнитных зондирующих систем. *Геофизика*. 1997. № 6. С. 8—14.

Шуман В. Н. Концепция динамически неустойчивой геосреды и сейсмоэлектромагнитный шум литосферы. *Геофиз. журн*. 2010а. Т. 32. № 6. С. 101—118.

Шуман В. Н. Магнитотеллурический импеданс: фундаментальные модели и возможности их обобщения. *Геофиз. журн*. 2010б. Т. 32. № 3. С. 18—28.

Шуман В. Н. Нелинейная динамика геосреды: переходные процессы и критические явления. *Геофиз. журн*. 2014б. Т. 36. № 6. С. 129—142.

Шуман В. Н. Нелинейная динамика, сейсмичность и аэрокосмические зондирующие системы. *Геофиз. журн.* 2015а. Т. 37. № 2. С. 38—55.

Шуман В. Н. Обобщенное уравнение генерации спонтанной электромагнитной эмиссии во фрактальной среде. *Геофиз. журн.* 2013а. Т. 35. № 3. С.46—53.

Шуман В. Н. О концептуальных основах диагностики и мониторинга геосистем. *Геофиз. журн.* 2015б. Т. 37. № 4. С. 114—125.

Шуман В. Н. О проблеме фоновой электромагнитно-акустической регуляции сейсмичности: геоинженерный аспект. *Геофиз. журн*. 2013б. Т. 35. № 1. С. 46—60.

Шуман В. Н. О прогнозе и прогнозируемости сейсмического процесса. *Геофиз. журн.* 2014в. Т. 36. № 1. С. 48—71.

Шуман В. Н. О феноменологических моделях и прогнозе сейсмичности: оправдан ли пессимизм, обоснованы ли надежды. *Геофиз. журн.* 2013в. Т. 35. № 2. С. 24—37.

Шуман В. Н. Переходные электромагнитные процессы в расширенном временном интервале: физико-математические модели и особенности. *Геофиз. журн.* 2001. Т. 23. № 1. С. 3—21.

Шуман В. Н. Переходные электромагнитные процессы на ранних временах в геологической среде с магнитоактивным плазменным компонентом. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 3. С. 32—40.

Шуман В. Н. Сейсмический процесс и современные мониторинговые системы. *Геофиз. журн.* 2014г. Т. 36. № 4. С. 50—64.

Шуман В. Н. Сейсмоэлектромагнетизм и пространственно-временные структуры. *Геофиз. журн.* 2015в. Т. 37. № 6. С. 24—43.

Шуман В. Н. Система локальных векторных тождеств импедансного типа для гармонического электромагнитного поля на замкнутой регулярной границе раздела и задачи геоэлектрики. *Геофиз. журн.* 2008а. Т. 30. № 3. С. 3—13.

Шуман В. Н. Скоростные характеристики электромагнитных импульсов в средах с дисперсией. *Геофиз. журн.* 2000. Т. 22. № 6. С. 108—120.

Шуман В. Н. Современные электромагнитные зондирующие системы: состояние, тенденции развития, новые идеи и задачи. *Геофиз. журн.* 2012а. Т. 34. № 4. С. 282—294.

Шуман В. Н. Спонтанная эмиссионная активность литосферы и сейсмоэлектромагнитные явления. *Геофиз. журн.* 2016б. Т. 38. № 2. С. 79—87.

Шуман В. Н. Уравнение генерации спонтанных электромагнитных сигналов в системе литосферных блоков. *Геофиз. журн.* 2008б. Т. 30. № 1. С. 42—48.

Шуман В. Н. Электродинамика геосреды и методы геоэлектрики. *Геофиз. журн.* 2010в. Т. 32. № 2. С. 28—42.

Шуман В. Н. Электродинамика и отклик геосреды на воздействие внешних электромагнитных полей. *Геофиз. журн.* 2013г. Т. 35. № 5. С. 129—149.

Шуман В. Н. Электродинамика фрактальных сред, переходное фрактальное рассеяние и электромагнитный шум литосферы. *Геофиз. журн.* 2012б. Т. 34. № 1. С. 3—13.

Шуман В. Н. Электромагнитная эмиссия литосферы: всегда ли мы адекватно трактуем то, о чем как будто знаем? *Геофиз. журн.* 2012в. Т. 34. № 2. С. 3—19.

Шуман В. Н. Электромагнитная эмиссия литосферы: новые экспериментальные результаты и анализ проблемы. *Геоінформатика.* 2010г. № 4. С. 79—93.

Шуман В. Н. Электромагнитно-акустические преобразования и высокоразрешающие зондирующие системы: новые возможности и новые формулировки старых вопросов. *Геофиз. журн.* 2012г. Т. 34. № 3. С. 32—39.

Шуман В. Н. Электромагнитные зондирования геологической среды: проблемы и парадоксы. *Геоінформатика.* 2003. № 4. С. 30—42.

Шуман В. Н. Электромагнитные сигналы литосферного происхожде-

ния в современных наземных и дистанционных зондирующих системах. *Геофиз. журн.* 2007. Т. 29. № 2. С. 3—16.

Шуман В. Н., Богданов Ю. А. Электромагнитная эмиссия литосферы: пространственная структура и возможные механизмы генерации. *Геофиз. журн.* 2008. Т. 30. № 6. С. 39—50.

Шуман В. Н., Коболев В. П., Богданов Ю. А., Захаров И. Г., Яцюта Д. А. Спонтанное электромагнитное излучение на акваториях: новый эксперимент и приложения. *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 4. С. 33—49.

Шуман В. Н., Коболев В. П., Старостенко В. И., Буркинский И. Б., Лойко Н. П., Захаров И. К., Яцюта Д. А. Метод анализа спонтанной электромагнитной эмиссии Земли: физические предпосылки, элементы теории, полевой эксперимент. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 4. С. 40—61.

Шуман В. Н., Левашов С. П., Якимчук Н. А., Корчагин И. Н. Радиоволновые зондирующие системы: элементы теории, состояние и перспектива. *Геоінформатика.* 2008. № 2. С. 22—50.

Шуман В. Н., Причепий Т. И. Оптимальные режимы электромагнитных зондирующих систем с контролируемым возбуждением поля в изотропных средах с дисперсией. *Геофиз. журн.* 2004. Т. 26. № 4. С. 55—62.

Шуман В. Н., Савин М. Г. Математические модели геоэлектрики. Киев: Наук. думка, 2011. 239 с.

Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. Введение в теорию диссипативных структур. Москва: Мир, 1979. 277 с.

Эпов М. И., Антонов Е. Ю. Исследование влияния параметров вызванной поляризации при нестационарных электромагнитных зондированиях сложно построенных геологических сред. *Геология и геофизика.* 2000. Т. 41. № 6. С. 920—929.

Aboul-Atta O. A., Boerner W.-M., 1975. Vectorial Impedance Identity for the Natural Dependence of Harmonic Fields on Closed Boundaries. *Can. J. Phys.* 53(15), 1404—1407.

Aksenov V. V., 1989. Algorithms of Physical Fields Separation. Novosibirsk: VTs SO RAN, 259, (in Russian).

Aksenov V. V., 1997. Electrical -Type Electromagnetic Field Generated by External Variation Sources and S_q Currents. *Geoph. J.* 17, 113—125.

Aksenov V. V., 2001. On the Inversion of the Main Geomagnetic Field. *Geofizicheskiy zhurnal* 23(2), 55—58 (in Russian).

Aplakov R. A., Chantladze I. K., 1984. The Geometric Meaning of a Directional Analysis. *Fizika Zemli* (4), 94—98 (in Russian).

Aschwanden M., J., Crosby N. B., Dimitropoulou M., Georgoulis M. K., Hergarten S., McAteer J., Milovanov A. V., Mineshige S., Morales L., Nishizuka N., Pruessner G., Sanches R., Sharma A. S., Strugarek A., Uritsky V., 2016. 25 Years of Self-Organized Criticality: Solar and Astrophysics. *Spase Sci. Rev.* 198(is. 1), 47—166.

Atmospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes. Ed. M. Hayakawa. Tokyo: Terra Sci. Publ. Company, 1999. 996 p.

Bak P., Tang C., 1989. Earthquakes as self-organized criticality. *J. Geophys. Res.* 94(15), 635—637.

Bak P., Tang C., Wiesenfeld K., 1987. Self-Organized Criticality: An Explanation of 1/f Noise. *Phys. Rev. Lett.* 59, 381—384.

Berdichevsky M. N., Vanyan L. L., Dmitriev I. O., 1971. On a Possibility to Ignore Vertical Currents in Magnetotelluric Sounding. *Fizika Zemli* (5), 69—78 (in Russian).

Berdichevsky M. N., Zhdanov M. S., 1981. Interpretation of Anomalies of the Earth's Alternating Electromagnetic Field. Moscow: Nedra, 327 p. (in Russian).

Berdichevsky M. N., Dmitriev I. O., 1991. Magnetotelluric Sounding of Horizontally-Homogenous Media. Moscow: Nedra, 250 p. (in Russian).

Constable S., 2010. Ten years of marine CSEM for hydrocarbon exploration. *Geophysics* 75, 75A67—75A81.

Chetaev D. N., 1985. A Directional Analysis of Magnetotelluric Observations. Moscow: IFZ AN SSSR, 203 p. (in Russian).

Earthquake Prediction: The Scientific Challenge, 2000. Collected papers. National Academy Press. Washington. DC. 55 p. http://www. ras.org. uk/ras.

Edwards R. N., 2005. Marine controlled source electromagnetic: principles, methodologic, future, commercial application. *Surv. Geophys.* 26, 575—600.

Eggers D. E., 1982. An eigenstate formulation the magnetotelluric impedance tensor. *Geophysics* 47, 1204—1214.

Gulelmi A. V., 1987. Hydromagnetic Diagnostics and Geo-Electrical Exploration. *Uspekhi fizicheskikh nauk* 152(4), 605—637 (in Russian).

Gulelmi A. V., Gokhberg M. B., 1987. On magnetotelluric Sounding in Seismoactive regions. *Fizika Zemli* (11), 122—123 (in Russian).

Geller R. J., 1997. Earthquake prediction: A critical review. *Geophys. J. Int.* 131, 425—450.

Gershenzon N., Bambakidis G., 2001. Modeling of seismo-electromagnetic phenomena. *Rus. J. Earth Sci.* 3(4), 247—275.

Gufeld I. L., Matveeva M. I., Novoselov O. N., 2011. Why we cannot predict strong earthquakes in the Earth's crust. *Geodynamic and Tectonophysics* 2(4), 378—415.

Jonscher A. K., 1983. Dielectric Relaxation in Solids. London: Chelsea Dielectric Press, 380 p.

Kagan Y. Y., 1994. Observational evidence for earthquakes as a nonlinear dynamic process. *Physica D* 77, 160—172.

Kamenetsky F. M. Stettler E. H., Trigubovich G. M., 2010. Transient Geoelectromagnetics. Ludwig-Maximilian University of Munich, Germany, 304 p.

Keener J. P., 1988. The dynamic of 3-dimensionalscroll waves in excitable media. *Physica D* 31, 69—276.

Keilis-Borok V. I., 1994. Symptoms of instability in a system of earthquake-prone faults. *Physica D* 77, 193—199.

Keilis-Borok V. I. Kossobokov V. G., 1990. Preliminary activation of seismic flow M8. *Phys. Earth Planet. Int.* 61, 73—83.

Kosobokov V. G., Keilis-Borok V. I., Romashkova L. L., Healy I. H., 1999. Testing earthquake prediction algorithms: statistically significant real-time prediction of the largest earthquake in the Circum-Pacific 1992—1997. *Phys. Earth Planet. Int.* 111, 187—196.

Kravchenko A. N., Nizhnik L. P., 1977. Electrodynamic Calculations in Electrical Engineering. Kiev: Tekhnika, 181 p. (in Russian).

Kuckec A. F., Nekut A. G., Thompson B. G., 1985. A Geomagnetic Scattering Theory for Evaluation of Earth Structure. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 8, 319—330.

Leontovich M. A., 1948. On Approximate Boundary Conditions for an Electromagnetic Field on the Surface of Highly-Conductive Bodies. In: *Studies on the propagation of radio waves*. Moscow: Publ. House AN SSSR, P. 5—12 (in Russian).

Lipskaya N. V., 1978. On the Selection of a Model of the Natural Alternating Electromagnetic Field. *Fizika Zemli* 12, 60—71 (in Russian).

Lyatsky V. B., Maltsev Yu. P., 1983. The Magnetospheric-Ionospheric Interaction. Moscow: Nauka, 189 p. (in Russian).

Mahmoud S. F., Botros A. Z., Wait J. R., 1979. Transient electromagnetic fields for a vertical magnetic dipole on two-layer earth. *Proc. IEEE*. 67, 1022—1029.

Morse P. M., Feshbach H., 1953. Methods of Theoretical Physics. Pt. I, II. New York: McGraw-Hill, 1810 p.

Ott E., Grebogi C., Yorke J. A., 1990. Controlling chaos. *Phys. Rev. Lett.* 64, 1196—2001.

Packard N. H., Crutchfield J. P., Farmer J. D., Shaw R. S., 1980. Geometry from a Time Series. Phys. Rev. Lett. 45(9), 712—716.

Perke S. L., Carlson M. M., 1994. Predictability of self-organizing systems. *Phys. Rev. E.* 50, 236—242.

Rokitiansky I. I., 1981. Inductive Soundings of the Earth. Kiev: Naukova Dumka, 296 p. (in Russian).

Rytov S. N., 1940. Skin-Effect Calculations by the Disturbance Methods. *Zhurnal Eksperimentalnoy i Teoreticheskoy Fiziki* 10(2), 180—189 (in Russian).

Semenov T. B., Shuman V. N., 2010. Impedance for induction soundings of the Earth's Mantle. *Acta Geophysica* 58(4), 527—542.

Senior T. B., Volakis A., 1995. Approximate boundary conditions in electromagnetics. London: IEE Press, 353 p.

Sibatov T., Uchaikin D. V., 2013. Fractional relaxation and ware equations for dielectrics characterized by the Havriliak—Negami response function. http:/nsc10/cankaya.edu.tr/proceedings.

Surkov V., Huyakava M., 2014. UltIa and Extiemely Low Fiequency Electromagnetic Fields. Springer Geophysics Series XVI, Springer Japan. 486 p.

Shuman V. N., 1993. Impedance Characteristics of a Field In Geo-Electromagnetic Research. *Geofizicheskiy zhurnal* 15(6), 17—27 (in Russian).

Shuman V. N., 1998. Angular Spectrum of a Source and Electrical Conductivity Functions in Magnetotellurics. *Geophys. J.* 17, 715—727.

Svetov B. S., Shimelevich M. I., 1988. Magnetotelluric Variation Processing. *Surv. Geophys.* 9, 259—285.

Tarasov V. E., 2008. Fractional vector calculus and fractional Maxwell's equations. *Ann. Physics.* 323, 2756—2778

Vanyan L. L., 1997. Electromagnetic Sounding. Moscow: Nauchnyy Mir, 218 p. (in Russian).

Vanyan L. L., Budkovskaya A. I., 1988. Magnetotelluric Sounding of Stratified Media. Moscow: Nedra, 227 p. (in Russian).

Zhdanov M. S., 2010. Electromagnetic geophysics: Notes from the past and the road ahead, commercial application. *Geophysics* 75, 75A49—75A66.

Оглавление

От ответственного редактора 5
The fundamental relations of impedance type in general theories of the electromagnetic induction studies (*Vladimir Shuman*, *Sergey Kulik*) 11
Концепция динамически неустойчивой геосреды и сейсмоэлектромагнитный шум литосферы 28
Геосреда и сейсмический процесс: проблемы управления 60
Геосреда как открытая нелинейная диссипативная динамическая система — задачи идентификации, возможности управления, прогноз эволюции (обзор) 83
Электродинамика фрактальных сред, переходное фрактальное рассеяние и электромагнитный шум литосферы 111
Электромагнитная эмиссия литосферы: всегда ли мы адекватно трактуем то, о чем как будто знаем? 131
Электромагнитно-акустические преобразования и высокоразрешающие зондирующие системы: новые возможности и новые формулировки старых вопросов 159
Современные электромагнитные зондирующие системы: состояние, тенденции развития, новые идеи и задачи 174
О проблеме фоновой электромагнитно-акустической регуляции сейсмичности: геоинженерный аспект 192
О феноменологических моделях и прогнозе сейсмичности: оправдан ли пессимизм, обоснованы ли надежды 219
Обобщенное уравнение генерации спонтанной электромагнитной эмиссии во фрактальной среде 245
Электродинамика и отклик геосреды на воздействие внешних электромагнитных полей 260
Высокочастотный спонтанный электромагнитный шум литосферы и томографические системы 297
О прогнозе и прогнозируемости сейсмического процесса 333
Сейсмический процесс и современные мониторинговые системы 376
Нелинейная динамика геосреды: переходные процессы и критические явления 400
Нелинейная динамика, сейсмичность и аэрокосмические зондирующие системы 425
О концептуальных основах диагностики и мониторинга геосистем 456
Сейсмоэлектромагнетизм и пространственно-временные структуры 476
Спонтанная эмиссионная активность литосферы и сейсмоэлектромагнитные явления 507
Дробная динамика и эмиссионная активность геосистем 522
О прогнозируемости активных геосистем: метастабильность и устойчивые переходы вместо аттракторов 542
Список литературы 579
Оглавление 607