

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

© В. Н. Шуман, 2011

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 5 апреля 2011 г.

Представлено членом редколлегии В.И. Старостенко

Огляд присвячено обговоренню деяких питань і методів досліджень сучасної теорії нелінійних динамічних систем, актуальних з позиції геофізичних застосувань. Увагу сконцентровано на інформаційному поведженні фізичних систем (зокрема геосистем), можливостях їх діагностики та прогнозу еволюції, використанні фрактальних моделей. Розглянуто нові підходи до аналізу спостережувальних часових рядів різної фізичної природи, породжуваних динамічними системами, які запропоновано в останні роки. Підкреслено роль і значення геофізичного моніторингу, орієнтованого на виявлення загальної структурної організації фізичних процесів, які відбуваються у сейсмоакустоелектромагнітно-генерувальному геосередовищі, реконструкцію та ідентифікацію динамічних систем (геосередовища). Обговорено явище "стохастичного резонансу" та його можливу роль у процесах самоорганізації і розвитку геосистем. В ослабленій постановці сформульовано задачу управління процесами в геосередовищі. Відзначено труднощі реалізації цієї ідеї, пов'язані зі змінами параметрів і стану геосередовища та можливостями здійснення керувального впливу на відносно коротких часових інтервалах, а також з обмеженістю можливих джерел впливу.

Review is dedicated to discussing some problems and methods of studies of modern theory of nonlinear dynamic systems, urgent from the viewpoint of geophysical applications. Attention is focused on informational behavior of physical systems (including geosystems), possibilities of their diagnostics and forecast of evolution, use of fractal models. New lately developed approaches to analysis of temporal sequences of different physical nature, produced by dynamic systems have been considered. Role and importance is accentuated on geophysical monitoring oriented towards revealing general structural organization of physical processes, which occur within seismic-acoustic-electromagnetic generating geomedium, on reconstruction and identification of dynamic systems (geomedia). The phenomenon of "stochastic resonance" and its possible role in processes of self-organization and development of geosystems is discussed. The problem of control of the processes in geomedium is formulated in abbreviated statement and difficulties in realization of this idea are noticed due to the changes of parameters and condition of geomedium and with possibility of realization of controlling action during relatively short temporal intervals as well as with limitation of possible sources of influence.

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 част-

ности, 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 [Садовский,

2004; Николаев, 2002; Гуфельд, 2007; Геншафт, 2009]. Стало очевидным, что геосреда существует и эволюционирует в пространстве и 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 сейсмоакустозлектромагнитной 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 сейсмоэнергетического [Стаховский, 2007]. Получены уравнения движения блочно-иерархических геофизических сред, учитывающие как их иерархическую структуру, так и волновые процессы в самих блоках [Даниленко, 1992]. 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., 2009а, б; Шуман, 2010]. 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. Тем не менее, несмотря на интенсивное развитие теории динамических систем (и диссипативных, и консервативных), достаточно мощный теоретический аппарат, адекватное описание геодинамических процессов, генерации и распространения эмиссий все еще является весь-

ма 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, несмотря на известные трудности и проблемы, основная задача нелинейно-динамического подхода к изучению геосреды, по-видимому, состоит в разработке на основе экспериментальных наблюдений адекватных динамических образов ключевых явлений и процессов, происходящих в геосистеме, а также 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 настоящей статьи — заимствуя результаты и методы сравнительно новой и быстро развивающейся области, сформировавшейся на стыке физики и теории управления [Фрадков, 2005; Кадомцев, 1994; 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 не видно 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 рассматривать 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 [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 [Климонтович, 1999а]. В них возможно спонтанное возникновение различных структур — диссипативных по терминологии И. Пригожина.

Выделяют три класса диссипативных структур: временные, пространственные и пространственно-временные (автоволны) [Климонтович, 1999б; 2002]. Сложность макроскопических открытых систем дает широкие возможности для проявления различных кооперативных явлений — коллективных взаимодействий в образовании диссипативных структур, фор-

мирующихся 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. Под самоорганизацией обычно понимают спонтанное образование и последующую эволюцию структур в неравновесных системах. Хорошо известно явление гидродинамической самоорганизации в метеорологии и физической океанографии [Зилитинкевич, 2010]. 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 [Николаев, 2002; Садовский, 2004; Геншафт, 2009]. 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 разным интервалом следования [Безручко и др., 2008].

Сейсмичность, сейсмоакустическая и электромагнитная эмиссии. Как свидетельствует эксперимент, литосфера генерирует сейсмические колебания в чрезвычайно широком диапазоне частот — от сотен 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) тоже в широком спектре частот — от долей герц до килогерц [Генштафт, 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 [Садовский, 2004; Николаев, 2002].

Многие вопросы этого круга детально рассмотрены в недавних публикациях [Шуман, 2007; Богданов и др., 2009а, б; Шуман, 2010; Цифра, Шуман, 2010]. По этой причине в данном изложении остановимся лишь на некоторых ключевых аспектах проблемы, акцентируя внимание на общности подходов, вытекающих 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. Общеприня-

той 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. Напомним, что автоволны — разновидность самоподдерживающихся волн в активных, т. е. содержащих распределенные источники энергии, средах (системах). 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 сформулирован так [Васильев и др., 1979]: *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, а также 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 энергия 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 удастся идентифицировать вид высокочастотного сигнала. А это не позволяет исследовать его частотный спектр и затрудняет 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, 2004; Садовский, 2004; Гульельми, 2007; Богданов и др., 2009а, б; Шуман, 2010]. 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; Генштафт, 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. Одна-

ко ситуация в последние годы существенно изменилась. Возникла нелинейная геофизика — новая область наук о Земле, тесно связанная с нелинейной динамикой (геодинамикой) [Николаев, 2002, Генштафт, 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 [Изаков, 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 переданное системе тепла

$$dQ = T ds.$$

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 $T_{\text{эфф}}$, то поток неэнтропии (энтропии с обратным знаком) S_i равен

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

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

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

или метрическая энтропия Колмогорова — Сина, которая служит мерой экспоненциального разбегания или сближения траекторий динамической системы [Лоскутов, 2010]. Примечательно, однако, что приток неэнтропии 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 — Паркарда 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 [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. Но, 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 яв-

ляется понятие нормы хаотичности [Климонтович, 1999а; 2002], которая также может быть определена по эмпирическим данным.

Далее коснемся вопроса о связи между неэнтропией 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 является достаточным при исследовании открытых систем [Климонтович, 1999б]. 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, 1999б; 2002]. 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 неэнтропии к физической системе равносителен притоку информации [Изаков, 1997].

Заметим, что рассмотрение открытой системы как управляемой притоком не только энергии, но и информации, помогает пониманию того, как в процессе самоорганизации развиваются сложные иерархические системы и как она может лучше приспособляться 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 микро-, 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, 1999б].

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 про-

странстве, 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. Известно также, что странные аттракторы в большинстве случаев не описываются аналитически — их можно изучать только численно [Лоскутов, 2010].

Используя это понятие, обычно 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]. Однако 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 продолжает 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, удастся 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 такие 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 получаемой информации о динамической системе и налагает большие ограничения на возможности ее реконструкции.

Разнообразие специфических ситуаций, наличие шумов различной природы и нестационарность предопределили появление семейства подходов к изучению временных рядов наблюдений. Эти подходы развивались в рамках математической статистики и спектрального анализа, теории информации, нелинейной динамики и др. [Безручко 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 пространства 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 размерность аттрактора, энтропию анализируемой динамической системы, некоторые другие инва-

риантные характеристики все же в ряде случаев можно 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 "эмпирически" 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; Packard et al., 1980].

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].

Важно, что 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 эффективной при исследовании зашумленных рядов относительно небольшой длины.

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 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, а к кибернетическим методам относят не только методы управления, но и методы оценивания переменных и параметров систем, методы фильтрации, распознавания образов и др. [Фрадков, 2005; Кадомцев, 1994]. Но, по мнению А. Л. Фрадкова, задачи управления в физических системах, вообще говоря, существенно отличаются от традиционных задач автоматического управления. Задачи управления в физических системах ставятся особенно проблемными при рас-

смотрении 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, 2011].

Заметим, что некоторые авторы считают управление в физических системах как принудительное, энергозатратное воздействие. 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 [Фрадков, 2005], стала достаточно быстро меняться после выхода в свет статьи [Ott et al., 1990] "Управление хаосом", 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 нужно перебросить из одной области притяжения на другую [Кадомцев, 1994]. Разумеется, для этого требуется затратить определенное количество энергии и, 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 нужную [Кадомцев, 1994].

Очевидно, переброс системы из одной области притяжения в другую с минимальными энергетическими затратами можно реализовать в точках бифуркации, где для выбора иной траектории развития достаточно мало 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 системы 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, 1995]. Следовательно, только слабое, имманентное текущему состоянию системы внешнее воздействие, реализующее иной выбор ее развития в точке ветвления, можно с полным правом называть управлением или регуляцией.

Ясно, что 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 она может быть измерена 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 с 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: существуют 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. Но, 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 продвинуться дальше, если воспользоваться явлением, представляемым традиционно как "стохастический резонанс" [Климонтович, 1999а; Анищенко и др., 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 при отсутствии 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, 2010]. Во всяком случае, есть основания предполагать, что это обстоятельство может пролить свет на существующую неопределенность в результатах экспериментальных попыток воздействия на сейсмический процесс [Гуфельд, 2007; Шуман, 2011]. 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 известно, неравновесные диссипативные системы обладают особенностью сильных изменений под действием слабых воздействий. Их характерная особенность — неустойчивость и пороговый характер самоорганизации. Как уже отмечалось, 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.

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 возможность осуществления макроперемещений по границам (контактам) структурных блоков при относительно слабом вибрационном воздействии на блочную среду [Гуфельд, 2007; Национальный ..., 2007]. Ис-

следована 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].

Важное 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, существует 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 (*T*-компонента, от англ. total — глобальный), контролирующий изменение во времени общего числа сильных землетрясений, и, во-вторых, *M*-компонента (от англ. mirror — зеркальный) для северного и южного полушарий и линейная *L*-компонента, характеризующаяся долговременным ростом или спадом сейсмической активности. При этом *T*-компонента наиболее отчетливо проявляется для самых сильных ($M \geq 5,5$) землетрясений, а *M*-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 установлено, что подземные ядерные взрывы на полигонах Невада, Семи-палатинск, 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 землетрясений с магнитудой $M \geq$

$\geq 8,3$: 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 иницирующее воздействие мощных электромагнитных импульсов от МГД-генератора на умеренные и слабые землетрясения с дальностью порядка 300 км. Во-вторых, обнаружено также влияние на сейсмичность массовых бомбардировок, имевших место в Югославии, Ираке и Афганистане. Дальность действия 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 иницирующему 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.

О прогнозе эволюции. Задача прогноза — путем анализа наблюдаемых (временных рядов наблюдений) оценить значения измеряемых характеристик изучаемой системы на некоторый отрезок времени вперед. Как известно, до сравнительно недавнего времени господствовало представление о том, что, располагая динамическими уравнениями и начальными данными, в принципе можно достигнуть удовлетворительного предсказания поведения любой физической системы. Однако в начале 70-х годов прошлого века с позиции теории нелинейных динамических систем произошел существенный пересмотр прежних представлений о "предсказуемой динамике" или характере динамических процессов, а именно, представлений о локальной неустойчивости

поведения сложных физических систем, роли хаотических и стохастических движений или ограничивающих предсказание их поведения на длительные промежутки времени. Согласно [Кравцов, 1989], главная особенность хаотических систем состоит в том, что малые возмущения начальных данных (условий) для динамических переменных или же малое изменение параметров самой динамической системы приводит к непредсказуемости результирующего ее развития за конечное время, названное Дж. Лайтхилом "горизонтом предсказуемости". Ограничивая во времени предсказуемость поведения динамических систем, все еще не получено исчерпывающего описания. Более того, с развитием нелинейной динамики стало очевидным, что задача прогноза зачастую вообще не укладывается в схемы, представляемые теорией [Кравцов, 1989; Лоскутов, 2010].

Что же в конечном счете ограничивает горизонт предсказуемости: шумы, помехи, длина обрабатываемых рядов наблюдаемых, а может недостатки модели? Очевидно, и постоянно действующие внешние иницирующие факторы (земные приливы, изменения скорости вращения Земли, сильные землетрясения, оказывающие существенное воздействие на эволюцию геосреды), и измерительные шумы (погрешности, связанные с неточностью входных данных, недостаточной сетью пунктов наблюдений и ограниченность систем сбора информации и ее ввода в ЭВМ), и ограниченность модельных представлений о геосреде могут и вносят существенный вклад в ограничение "физического" горизонта предсказуемости. Можно, однако, предположить, что по мере развертывания наблюдательной сети станций и совершенствования сбора и анализа информации на первый план выйдут погрешности, связанные с ограниченностью модельных представлений (моделей подготовки землетрясений) [Национальный ..., 2007]. Но первые два обстоятельства — расширение сети, телеметрия и анализ информации — удорожают прогноз. И может случиться так, что, прежде всего, именно ограничения экономического и технического характера станут существенно влиять на прогноз, хотя он в определяющей степени и зависит от удачно выбранной модели. Поводом для сдержанного оптимизма в подходе к прогнозу на ограниченных интервалах времени может служить тот факт, что процесс подготовки землетрясения не является чисто хаотическим, а содержит детерминированную

компоненту, которую можно описать аналитически [Национальный ..., 2007]. Тем не менее, основной причиной, суживающей горизонт предсказуемости, является наличие шумов различного происхождения, присутствующих в любой физической системе. В этой связи важно попытаться понять, как ограничить влияние хаоса там, где его можно и необходимо ограничить. Важно также отличать непредсказуемость от локальной непредсказуемости в окрестности точек бифуркаций.

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

мых, 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, отвечающими 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 выявления точек бифуркаций, 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. В частности, задачи идентификации и прогноза оказались значительно более сложными и часто не укладываются в схемы, предоставляемые нелинейно динамической теорией.

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

Список литературы

- Анищенко В. С., Нейман А. Б., Мосс Ф., Шимановский-Гайер Л. Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения степени порядка // Успехи физ. наук. — 1999. — **169**, № 1. — С. 7—37.
- 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. — **178**, № 3. — С. 323—329.
- Богданов Ю. А., Коболев В. П., Шуман В. Н. Вариации сейсмоэлектромагнитного фона Земли и сейсмическая активность // Геофиз. журн. — 2009 а. — **31**, № 3. — С. 95—106.
- Богданов Ю. А., Павлович В. Н., Шуман В. Н. Спонтанная электромагнитная эмиссия литосферы: состояние проблемы и математические модели // Геофиз. журн. — 2009 б. — **31**, № 4. — С. 20—33.
- Болотовский Б. М., Серов А. Б. Особенности поля переходного излучения // Успехи физ. наук. — 2009. — **179**, № 5. — С. 517—524.
- Васильев А. Н., Романовский Ю. М., Яхно В. Г. Автоволновые процессы в распределенных

- кинетических системах // Успехи физ. наук. — 1979. — **128**, вып. 4. — С. 625—666.
- Гарькавый Н.Н., Левицкий Л.С., Гайдакова Т.А., Трапезников Ю.А., Фригман 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.
- Гинзбург В.Л., Цытович В.Н. Переходное излучение и переходное рассеяние (некоторые вопросы теории). — Москва: Наука, 1984. — 360 с.
- Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Гершензон Н.И., Пилипенко В.А. Электромагнитные эффекты при разрушении земной коры // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1985. — № 1. — С. 72—87.
- Гульельми А.В. Ультранизкочастотные волны в коре и в магнитосфере Земли // Успехи физ. наук. — 2007. — **177**, № 12. — С. 1257—1276.
- Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. — Королев. М.О.: ЦНИИМам, 2007. — 160 с.
- Давыдов В.А., Зыков В.С., Михайлов А.С. Кинематика автоволновых структур в возбудимых средах // Успехи физ. наук. — 1991. — **161**, № 8. — С. 45—86.
- Даниленко В. А. К теории движения блочно-иерархических геофизических сред // Докл. АН Украины. — 1992. — № 2. — С. 87—90.
- Дмитриевский А.Н., Вологин И.А. Формирование и динамика энергоактивных зон в геологической среде // Докл. РАН. — 2006. — **411**, № 3. — С. 395—399.
- Зилитинкевич С.С. Самоорганизация и нелокальная природа геофизической турбулентности и планетарных пограничных слоев // Геофиз. журн. — 2010. — **32**, № 6. — С. 169—174.
- Зосимов В.В., Лямшев А.М. Фракталы в волновых процессах // Успехи физ. наук. — 1995. — **165**, № 4. — С. 362—401.
- Изаков М.Н. Самоорганизация и информация на планетах и в экосистемах // Успехи физ. наук. — 1997. — **167**, № 10. — С. 1087—1094.
- Кагомцев Б.Б. Динамика и информация // Успехи физ. наук. — 1994. — **164**, № 5. — С. 449—530.
- Климонтович Ю.Л. Введение в физику открытых систем. — Москва: Янус, 2002. — 240 с.
- Климонтович Ю.Л. Что такое стохастическая фильтрация и стохастический резонанс? // Успехи физ. наук. — 1999а. — **169**, № 1. — С. 39—47.
- Климонтович Ю.Л. Энтропия и информация открытых систем // Успехи физ. наук. — 1999б. — **169**, № 4. — С. 443—452.
- Кравцов Ю. А. Случайность, детерминированность, предсказуемость // Успехи физ. наук. — 1989. — **158**, № 1. — С. 93—121.
- Лоскутов А.Ю. Очарование хаоса // Успехи физ. наук. — 2010. — **180**, № 12. — С. 1305—1329.
- Любушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга / Отв. ред. Г.А. Соболев. — Москва: Изд. Ин-та физики Земли РАН, 2007. — 228 с.
- Мартынов Г.А. Неравновесная статистическая механика, уравнения переноса и второе начало термодинамики // Успехи физ. наук. — 1996. — **166**, № 10. — С. 1105—1133.
- Мухамедов В.А. О фрактальных свойствах высокочастотного сейсмического шума и механизмах его генерации // Физика Земли. — 1992. — № 3. — С. 39—49.
- Национальный отчет Международной ассоциации сейсмологии и физики недр Земли Международного геодезического союза 2003—2006 к XXIV Генеральной ассамблее ИГГС. — Москва: РАН, Нац. геофиз. комитет, 2007. — <http://ngc.gcras.ru/>
- Николаев А.В. Развитие методов нелинейной геофизики // Электронный научно-информ. журн. "Вестник ОГПТГ РАН". — 2002. — № 1 (20).
- Руденко О.В. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // Успехи физ. наук. — 2006. — **176**, № 1. — С. 77—95.
- Саговский М. А. Геофизика и физика взрыва. Избр. тр. / Отв. ред. В.В. Адушкин. — Москва: Наука, 2004. — 440 с.
- Сливак 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.
- Стаховский И.Р. Самоподобная сейсмогенери-

- рующая структура земной коры: обзор проблемы и математическая модель // Физика Земли. — 2007. — № 12. — С. 35—47.
- Сурков В.В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. — Москва: Изд. Моск. инж.-физ. ин-та, 2000. — 238 с.
- Фрагков А.Л. О применении кибернетических методов в физике // Успехи физ. наук. — 2005. — **175**, № 2. — С. 113—138.
- Фригман А.М., Поляченко Е.В., Насырканов Н.Р. О некоторых корреляциях в сейсмодинамике и двух компонентах сейсмической активности Земли // Успехи физ. наук. — 2010. — **180**, № 3. — С. 303—312.
- 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. — **32**, № 5. — С. 51—60.
- Шуман В.Н. Геосреда и сейсмический процесс: проблемы управления // Геофиз. журн. — 2011. — **33**, № 2. — С. 16—27.
- Шуман В.Н. Концепция динамически неустойчивой геосреды и сейсмoeлектромагнитный шум литосферы // Геофиз. журн. — 2010. — **32**, № 6. — С. 101—118.
- Шуман В.Н. Электромагнитные сигналы литосферного происхождения в современных наземных и дистанционных зондирующих системах // Геофиз. журн. — 2007. — **29**, № 2. — С. 3—16.
- Bak P., Tang C. Earthquakes as self-organized criticality // J. Geophys. Res. — 1989. — **94**, № 15. — P. 635—637.
- Ott E., Grebogi C., Yorke J.A. Controlling chaos // Phys. Rev. — 1990. — **64**. — P. 1196—1208.
- Packard N.H., Crutchfield J.P., Farmer J.D., Shaw R.S. Geometry from a Time Series // Phys. Rev. Lett. — 1980. — **45**, № 9. — P. 712—716.