

О феноменологических моделях и прогнозе сейсмичности: оправдан ли пессимизм, обоснованы ли надежды

© В. Н. Шуман, 2013

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 11 июня 2012 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

Розглянуто деякі проблеми, а також методи моделювання і прогнозу сейсмічності. Увагу сконцентровано на феноменологічному підході. Підкреслено онтологічну складність дослідження реального геосередовища — відкритої нелінійної дисипативної системи, та багатofакторність впливу на неї фізичних полів зовнішнього походження. Викладення спирається на той факт, що самоорганізовані критичні системи є слабохаотичними. Суттєво, що на відміну від повністю хаотичних такі системи, в принципі, є відносно прогнозованими. Це привносить у розв'язок проблеми відомі перспективи, а в аналіз часових рядів (спостережуваних), які мають фрактальну структуру, — важливі деталі.

Some problems and methods of modeling and seismic activity forecast are considered. Attention is concentrated on phenomenological approach. Ontological complexity of the real geome-dium studies is underlined — the open nonlinear dissipative dynamic system — and multifactor way of undergo of external physical fields. Recital is based on the fact that self-organized critical systems are slightly chaotic ones. It is sufficient that in contrast to completely chaotic ones such systems are in principle relatively long-term predictable. It brings to the solution of the problem definite perspectives, and to the analysis of temporal sets (observed ones) having fractal structure — important details.

Введение. Сейсмическая активность, ее прогноз — интенсивно развивающаяся область современной геофизики [Geller, 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 T -компоненты, и быстро меняющейся M -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].

Очевидно, механизмы их генерации совершенно различны [Гуфельд, 2007; Gufeld et al., 2011]. Слабая сейсмичность контролируется

действием внешних и внутренних сил. Наиболее многочисленные и активные источники поля микросейсмических колебаний различного частотного диапазона расположены непосредственно в твердой Земле. Дополняет эту часть поля местная сейсмичность (сейсмоакустическая эмиссия), формируемая локальными релаксационными процессами и подвижками блоков земной коры [Адушкин, Спивак, 2012].

Наиболее универсальным и не подлежащим сомнению экспериментальным фактом, относящимся к сейсмическому процессу, является установление разнообразных законов подобия, выполняющихся в широком диапазоне масштабов. К ним относятся закон Гутерберга—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 al., 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 мало реализуемой, 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, стохастиче-

ский 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 [Келдыш, 1989; Кадомцев, 1994; Ильинский, Шуман, 2010, 2012а, б].

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 формализованы 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 отдельных блоков, 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 переменного 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 завершения, 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 быстрая 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] (Важнейшие..., 2012; 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-деформированного 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. Как известно, для этого периода можно говорить об изменении характера сейсмической активности: в этот период 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, собственно 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. Ясно, 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 пред-

ставлением 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, как правило, 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 незначительной 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 подвер-

женных 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 слабо хаотические 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 тер-

мин «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 слабо хаотичны. 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». И, 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 (неде-

терминированных 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 так же 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]. В итоге, по мнению О. В. Шарыпова, динамическая система, переходя к хаотическому режиму, не просто усиливает этот «слабый шум» благодаря неустойчивости, но «...без этих слабых случайных возмущений хаос возникнуть не может» [Шарыпов, 2001].

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 кон-

тинуальной 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 известно, 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, 2010, 2011а, б, 2012б]. 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_i нахождения фазовой траектории на аттракторе соответствует универсальным закономерностям вида

$$T_i \sim (a - a_{кр})^\gamma,$$

где a — нелинейный параметр системы; $a_{кр}$ — 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 — повышения 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 2009а, б, 2011]. Один из наиболее разработанных алгоритмов, по-видимому, является алгоритм М8 [Keiliz-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 М8. Они определяются количеством событий, отклонением 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 существенно затруднено, так как она не воспроизводит буквально физику процесса, не демонстрирует активизации сейсмичности перед крупными событиями, обладает универсальным показателем в законе повторяемости Гуттенберга—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 Гуттенберга—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 мо-

ниторинга 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 по-

следовательности 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 изоцирленно-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;
- какова 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 отдельных границ между блоками в ИК-излучении указывают на активизацию сброса энергии геосредой.

Перспективы использования с этой целью вариаций электромагнитного поля, геомаг-

нитного 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, 2012б].

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 последова-

тельность 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 не существует.

Существует реальная возможность различного физического содержания процессов генерации, наблюдаемых (в частности, сейсмозлектромагнитного 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 в геофизике. Успех в применении фрактальных моделей обусловлен, по мнению, В. В. Зосимова и Л. М. Лямшева, пре-

жде всего тем, что фрактальные формы присутствуют 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 D . 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

$$\langle |f(t+\delta) - f(t)| \rangle \sim \delta^H \text{ при } \delta \rightarrow 0,$$

$$\langle [f(0) - f(t)]^2 \rangle \sim t^{2H},$$

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 область 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 конечность 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, контролирующей 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, слабо хаотические системы, в отличие от полностью хаотических, в принципе позволяют осуществлять относительно долговременный прогноз. Это привносит в проблему 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., которая считается «главным течением» (мейнстримом) на современном этапе, все же представляется недостаточно обоснованным и очевидным.

Физический смысл, механизмы и процессы в системе в этом случае 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, контролирующей подготовку, и протекание сейсмических явлений. Отчетливо видна также необходимость комплексного мониторинга и комплексного подхода в решении проблемы.

Список литературы

- Агушкин 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. — 10, № 1. — С. 47—57.
- 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—38.
- Бак П., Чен К. Самоорганизованная критичность // В мире науки. — 1991. — № 3. — С. 16—24.
- Геншафт Ю. С. Земля — открытая система: геологические и геофизические следствия // Физика Земли. — 2009. — № 8. — С. 4—12.
- Гийон Э., Митеску К. Д., Юлен Ж.-П., Ру С. Фракталы и перколяция в пористой среде // Успехи физ. наук. — 1991. — 161, № 10. — С. 121—128.
- Гуфельд И. Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. — Королев: ЦНИИМам, 2007. — 160 с.
- Дайсон Ф. Птицы и лягушки в математике и физике // Успехи физ. наук. — 2010. — 180, № 8. — С. 859—870.
- Даниленко В. А. К теории движения блочно-иерархических геофизических сред // Докл. АН Украины. — 1992. — № 2. — С. 87—90.
- Дубовиков М. М., Старченко Н. В. Эконофизика и фрактальный анализ временных рядов // Успехи физ. наук. — 2011. — 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.
- Зосимов В. В., Лямшев Л. М. Фракталы в волновых процессах // Успехи физ. наук. — 1995. — 165, № 4. — С. 361—401.
- Изаков М. Н. Самоорганизация и информация на планетах и в экосистемах // Успехи физ. наук. — 1997. — 167, № 10. — С. 1087—1094.
- Ильинский Ю. А., Келдыш Л. В. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом. — Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1989. — 304 с.
- Кагомцев Б. Б. Динамика и информация // Успехи физ. наук. — 1994. — 164, № 5. — С. 449—530.
- Кисин И. Г. Явление самоорганизации при взаимодействии флюидных потоков и геодинамических процессов в земной коре // Геофизика XXI столетия: 2007 г. Сб. трудов девятого геофизического чтения им. В. В. Федынского (1—3 марта 2007 г., Москва) — Тверь: ООО «Изд-во ГЕРС», 2008. — С. 82—88.
- Климонтович Ю. А. Что такое стохастическая фильтрация и стохастический резонанс // Успехи физ. наук. — 1999. — 169, № 1. — С. 39—47.
- Кравцов Ю. А. Случайность, детерминированность, предсказуемость // Успехи физ. наук. — 1989. — 158, вып. 1. — С. 93—121.
- Лоскутов А. Ю. Очарование хаоса // Успехи физ. наук. — 2010. — 180, № 2. — С. 1305—1329.
- Лук А. А., Дещерский А. В., Сигорин А. Я., Сигорин И. А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. — Москва: ОИФЗ РАН, 1996. — 210 с.
- Саговский М. А. Геофизика и физика взрыва. Избр. тр. / Отв. ред. В. В. Адушкин. — Москва: Наука, 2004. — 440 с.
- Смирнов Б. М. Излучательные процессы с участием фрактальных структур // Успехи физ. наук. — 1993. — 163, № 7. — С. 50—63.

- Смирнов В. Б., Пономарев А. В., Qianjadong, Черепанцев А. С. Ритмы и детерминированный хаос в геофизических временных рядах // Физика Земли. — 2005. — № 6. — С. 6—28.
- Старостенко В. И., Даниленко В. А., Венгрович Д. Б., Кутас Р. И., Стифенсон Р. А., Стомба С. Н. Моделирование эволюции осадочных бассейнов с учетом структуры природной среды и процессов самоорганизации // Физика Земли. — 2001. — № 12. — С. 40—51.
- Филатов В. В. Динамические системы и задачи прогноза: Докл. на конф. «Гео — Сибирь 2008». — www.sscs.ru/Conf/mm08/papers.
- Фригман А. М., Поляченко Е. В., Насырканов Н. Р. О некоторых корреляциях в сейсродинамике и двух компонентах сейсмической активности Земли // Успехи физ. наук. — 2010. — **180**, № 3. — С. 303—312.
- 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. — **181**, № 7. — С. 767—773.
- Шаповал А. Б. Вопросы прогнозируемости в изотропных моделях с самоорганизованной критичностью: Автореф. дис. д-ра физ.-мат. наук. — Москва, 2011. — 35 с.
- 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.
- Шарыпов О. В. Детерминированный хаос и случайность // Философия науки. — 2001. — № 2. — С. 71—84.
- Шуман В. Н. Геосреда и сейсмический процесс: проблемы управления // Геофиз. журн. — 2011а. — **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. — **33**, № 5. — С. 35—50.
- Шуман В. Н. Концепция динамически неустойчивой геосреды и сейсмoeлектромагнитный шум литосферы // Геофиз. журн. — 2010. — **32**, № 6. — С. 101—118.
- Шуман В. Н. Электродинамика фрактальных сред, переходное рассеяние и электромагнитный шум литосферы // Геофиз. журн. — 2012а. — **34**, № 1. — С. 3—13.
- Шуман В. Н. Электромагнитная эмиссия литосферы: всегда ли мы адекватно трактуем то, о чем как будто знаем? // Геофиз. журн. — 2012б. — **34**, № 2. — С. 4—19.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-Organized Criticality: An Explanation of 1/f Noise // Phys. Rev. Lett. — 1987. — **59**. — P. 381—384.
- Geller R. J. Earthquake prediction: A critical review // Geophys. J. Int. — 1997. — **131**. — P. 425—450.
- Gufeld I. L., Matveeva M. I., Novoselov O. N. Why we cannot predict strong earthquakes in the Earth's crust // Geodynamics and Tectonophysics. — 2011. — **2**, № 4. — P. 378—415. — DOI:10.5800/GT2011240051.
- Keilis-Borok V. I., Kossobokov V. G. Preliminary activation of seismic flow: Algorithm M8 // Phys. Earth Planet. Int. — 1990. — **61**. — P. 73—83.
- Kossobokov V. G., Keilis-Borok V. I., Romashkova L. L., Healy J. H. Testing earthquake prediction algorithms: statistically significant real-time prediction of the largest earthquake in the Circum-Pacific, 1992—1997 // Phys. Earth Planet. Int. — 1999. — **111**. — P. 187—196.