

О прогнозе и прогнозируемости сейсмического процесса

© В. Н. Шуман, 2014

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 12 декабря 2013 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

На підставі ідей і методів нелінійної динаміки обговорено особливості еволюції геосередовища, яке має властивості самоорганізованої критичності, питання фізики руйнації в земній корі, прогнозованості та прогнозу динаміки сейсмічного процесу. Підкреслено, що ключові проблеми багаторівневої самоорганізації та врахування нелінійності ієрархічно організованих геосистем все ще слабо розроблені і потребують конкретизації. Увагу приділено деяким аспектам формування вогнищевих зон руйнації в земній корі, стадії передруйнації та надшвидкої катастрофічної стадії еволюції. Розглянуто режими збудження автоструктур у геосередовищі, питання відтворення великомасштабних розривів. Зроблено спробу інтерпретації сильної сейсмічної події як автоструктури (автосолітону) великої амплітуди або локалізованої дисипативної структури загострення, яка формується в геосередовищі за жорсткого режиму його збудження як складової частини єдиного сейсмічного процесу. Обговорено проблеми, пов'язані з питаннями принципової передбачуваності процесу, властивостями переміжності, синхронізації, явищем стохастичного резонансу, задачами динамічного опису нелінійних систем з хаотичною поведінкою за даними моніторингових спостережень. Зазначено, що наявність режиму загострення процесу (фази передруйнації) можна розглядати як фізико-механічну основу існування, проявлення та пошуків провісникових явищ. З цієї позиції проблема прогнозу сильних землетрусів не виглядає безнадійною і дає підстави для оптимізму.

Ключові слова: сейсмічність, спонтанні флуктуації, динаміка, динамічні системи, синхронізація автоколивань.

Введение. Сейсмичность, ее природа, безусловно, относятся к группе фундаментальных проблем и приоритетных направлений геофизики. К настоящему времени предложено множество моделей по физике и динамике очага землетрясений и сейсмического процесса в целом. В различных ракурсах, аспектах и подходах эти вопросы отражены в классических работах Джеффриса (1960), Гуттенберга (1963), Магницкого (1965), Стейси (1972), Буллена (1978), Цубои (1982). Новые подходы к анализу сейсмичности изложены в серии монографий Садовского, Писаренко (1991), Садовского (2004), Соболева (1993), Лука и др. (1996), Викулина (2003), Ребецкого (2007), Гуфельда (2007) и многих других авторов.

Принято считать, что сейсмичность обусловлена гидродинамикой — конвекцией в мантии, хотя ее структура из-за трудностей решения этой проблемы до настоящего времени подроб-

но не рассматривалась. Предполагается, что внутри Земли могут существовать диссипативные (или, возможно, почти диссипативные) структуры — трехмерные гидродинамические течения со сферической симметрией, в частности в жидком внешнем ядре, что, в конечном счете, и может быть источником движения литосферных плит и связанных с ним очагов землетрясений. При потоке газов из низов литосферы также возможно формирование различных структур за счет их радиальных и аксиальных потоков. При этом источник, мотор всей геодинамики, — геотермический поток со средней мощностью порядка 90 мВт/м^2 , что при интегрировании по всей поверхности Земли дает полную мощность около $4,5 \cdot 10^{13} \text{ Вт}$. К сожалению, наши возможности и методы исследования процессов в земных недрах, их моделирования, вычисления, имитации все еще достаточно скром-

ны и находятся вблизи или за барьером их понимания. В итоге возникают мифические теории, на какое-то время способные объяснить имеющиеся результаты экспериментальных исследований, их некоторую совокупность или вообще не ставят такие задачи. Но, как известно, эксперимент сам по себе не обязательно прямо ведет к пониманию наблюдаемых явлений: основываясь только на эксперименте, зачастую весьма проблематично разделить причины и следствия наблюдаемых явлений.

Как известно, характерная особенность сейсмического процесса в предельно энергонасыщенной геосреде — его неустойчивость. При этом и сейсмичность, и электромагнитная эмиссия обладают ярко выраженными свойствами нелинейных процессов, способностью к периодической самоорганизации и хаотизации, характерному поведению при приближении к землетрясению и после него.

Существует ряд базовых моделей подготовки очагов землетрясений. Отметим некоторые из них. Это модель лавинно-неустойчивого трещинообразования, дилатансно-диффузионная модель, модель консолидации Добровольского, модели неустойчивого скольжения, фазовых переходов и др. Применительно к конкретным условиям эти базовые модели усложнились с перспективой превращения их в имитационные. Получил широкое развитие так называемый неоклассический подход к проблеме, который многими считается главным направлением (мейнстримом) в исследованиях сейсмичности, основанный на идеях и методах нелинейной динамики, в частности теории самоорганизованной критичности (СОК). Эта парадигма — парадигма эволюции системы к критическому состоянию без привлечения каких-либо параметров, разработанная Баком, Тангом и Визенфельдом (модель БТВ) сразу же привлекла к себе повышенное внимание [Bak et al., 1987]. Наличие достаточно обширных сейсмических данных (рядов наблюдений) в общих чертах подтверждает, что представление о самоорганизации сейсмического процесса, вообще говоря, согласуется с предсказуемостью сильных сейсмических событий и позволяет оценить применимость теории СОК к описанию процесса их формирования. Тем не менее, несмотря на то, что мы располагаем достаточно большим набором моделей, один из основных аспектов сейсмичности — возможность ее прогноза, особенно краткосрочного, общий подход к проблеме предсказуемости все еще не получили адекватного описания. Многие геофизики все еще пы-

таются обходить эти вопросы, считая их неудобными или некорректными.

Разумеется, построение сейсмической динамики, прежде всего феноменологической модели сейсмической активности, оказалось необычно сложной и пока нерешенной задачей. Дискуссия о возможности прогноза опирается на представление о сейсмическом процессе как об эволюции блоков с самоподобной структурой. Наиболее универсальный и не подлежащий сомнению экспериментальный факт, относящийся к сейсмическому процессу, — установление разнообразных законов подобия, выполняющихся в широком диапазоне масштабов. К ним относится закон Гуттенберга—Рихтера о сейсмической зависимости частоты повторяемости от энергетического класса землетрясения и закон Кнопова—Когана для распределения интервалов между событиями.

Традиционный путь решения прогнозных задач — анализ корреляционных связей между аномальным проявлением в физических полях и их пространственным распределением, механизмом и динамикой очагов сейсмических событий с привлечением различных критериев сейсмичности: геологических, тектонических, космических и др. Это — анализ и обобщение результатов теоретических исследований взаимосвязей геофизических полей и сейсмического процесса, обработка статистических данных (рядов наблюдений), построение статистических зависимостей прогноза состояния геосреды, моделирование сейсмического процесса в сейсмогенерирующих зонах, обнаружение и систематизация вариаций геофизических полей в зонах активных разломов при изменяющихся геологических условиях.

Своеобразие нынешнего этапа исследований — формирование взглядов на геосреду как открытую иерархическую неоднородную физически нелинейную систему, изменяющуюся во времени, активное проникновение к ее изучению идей и принципов нелинейной динамики. Получила значительное развитие сама теория динамических систем. В основных чертах построена теория бифуркаций динамических систем большой размерности, теория перехода от детерминированного их поведения к хаотическому, выполнены важные исследования по генерации и распространению нелинейных волн и локализованных состояний для ряда пространственно-распределенных систем [Кадомцев, 1994; Малинецкий, Курдюмов, 2001; Лоскутов, 2010].

С учетом этих результатов получен ряд интересных результатов о динамике геосистем и

адекватной интерпретации их поведения в терминах теории динамических систем. В частности, были обнаружены сложные пространственно-временные изменения параметров литосферы, происходящие на различных пространственных масштабах и в широком диапазоне частот. Установлено, что сама геосистема является иерархией подсистем, а протекающие в ней процессы носят кооперативный характер.

Основные свойства геосреды как динамической системы — диссипативность динамики, компенсация энергетических потерь за счет действия внешних источников, активность ее отдельных элементов (блоков различного ранга) — являются типичными для автоколебательных систем нелинейной динамики. Эксперимент дает весомые основания для предположения об автоволновом характере деформационного процесса, развивающегося в системе блоков земной коры. При этом неустойчивое скольжение вдоль разломов в этой блочной системе также обладает признаками автоколебаний.

Тем не менее, несмотря на имеющийся широкий спектр моделей геосреды и происходящих в ней процессов, сама проблема прогноза и прогнозируемости сейсмического процесса весьма активно сопротивляется пониманию и весьма далека от решения [Шаповал, 2011; Страхов, Савин, 2013 а—в; Шуман, 2013 в].

Итак, почему же долгосрочные прогнозы сейсмической активности далеко не точны и почему не удаются краткосрочные [Keilis-Ворок, 1994]? Помогут ли нам здесь бифуркации и заслуживает ли внимания дискуссия о принципиальной возможности (или невозможности) предсказания сейсмических событий [Страхов, Савин, 2013 а—в]? Обосновано ли замечание И. Гуфельда "о безысходности в представлениях о сейсмическом процессе" [Гуфельд, 2013 а]?

Парадоксальным является даже отношение к одному и тому же событию — Великому японскому землетрясению 11 марта 2011 г.:

- иллюстрацией действующей ситуации, по мнению [Гуфельд и др., 2011], является его пропуск, несмотря на то, что условия для его мониторинга были уникальными;
- с другой стороны, по мнению автора работы [Сидорин, 2011], — это "выдающееся достижение Российской академии наук: успешный прогноз землетрясения в Японии 11 марта 2011 г.", выполненный А.А. Любушиным [Любушин, 2011].

Заметим в этой связи, что, вообще говоря, прогноз нужен не в качестве "прогноза в принципе", а как прогноз к нужному моменту времени, когда он еще имеет смысл. Вполне вероятно, что это обстоятельство есть необходимым условием дальнейшего развития и "выживания" этого направления исследований, которое наталкивается на значительные трудности в изучении геосистем, связанное с их необычностью, сложностью, отсутствием понимания архитектуры и принципов межсистемных, в частности, межблоковых взаимодействий. Понятно, что для этого, прежде всего, нужна новая теория.

Вторая опасность связана с тем, что фундаментальные теории в этой области исследований неизбежно оказываются все меньше интересными широкому кругу геофизиков. Так что же, сбывается прогноз одного из основателей квантовой механики Е. Вигнера о конце науки, причем конце скором [Хорган, 2001]? И, тем не менее, проблема не выглядит совершенно безнадежной. Пессимизм связан здесь, в основном, с имеющимся негативным опытом прогноза. Даже принимая эту точку зрения, вполне можно рассматривать отдельные аспекты этой проблемы: можно, в принципе, понять эти системы, даже если не можем их предсказать.

Возможно, в наиболее концентрированной форме пессимизм в отношении состояния проблемы прогноза и перспектив ее решения присутствовал и доминировал на совещании "Оценка проектов по прогнозу землетрясений" (Лондон, 7—8 ноября 1996 г.) [Earthquake ..., 1996]. Не вызывают энтузиазма и некоторые положения Решения Российского экспертного совета (РЭС) по прогнозу землетрясений и оценке сейсмической опасности от 23 декабря 2012 г., краткие тезисы которого приведены в работе [Страхов, Савин, 2013 а—в]. В частности, это замечание о вторичности, а иногда и вредности теории в попытках объяснения экспериментальных фактов, привлечением положений парапсихологии, таких как интуиция, телекинез, ясновидения и др. Очевидно, это уже совсем рядом или граничит с экстрасенсорикой. Тогда найдется ли здесь место надеждам и перспективам исследований сейсмичности как физического явления? Вероятно, следует признать, что если и существуют принципиально неустранимые причины непредсказуемости, то ни в коей мере не в характере и недостатках физической теории.

Как известно, нелинейная динамика, хотя и лишает нас иллюзии глобальной предсказуемости таких систем, как геосреда, тем не менее она, в принципе, позволяет установить, сколь-

ко переменных необходимо для ее описания и сколько для ее предсказания с учетом некоторого "горизонта прогноза" и каким должен быть эксперимент (мониторинг). Но если это так, то нельзя ли попытаться избежать хаоса там, где его можно и нужно избежать?

Как известно, еще в 70-х годах прошлого века, благодаря трудам В. Арнольда, А. Колмогорова, Я. Синая, С. Смайль, Ф. Такенса и других авторов, сформулировалось качественно новое представление о локальной неустойчивости поведения большинства сложных физических систем важнейшей роли хаотических и стохастических процессов, не допускающих предсказаний на достаточно длительный промежуток времени. Но, очевидно, находясь в рамках чисто математических подходов, терминов и понятий, в этом многообразии легко потерять ориентацию, и чтобы выбраться, необходима четкая физическая постановка проблемы, сформулировать которую можно лишь на основе анализа основ теории и натурального эксперимента. Некоторым попыткам, отдельным фрагментам такого анализа, опираясь на ряд работ этого цикла последних лет, и посвятим дальнейшее изложение.

Геосреда и сейсмический процесс. Как результат обобщений многолетних экспериментальных исследований физических свойств горных пород в их широком петрофизическом и фациальном разнообразии, физических характеристик и термодинамических условий в 80-х годах прошлого века произошел перелом в понимании свойств геосреды как открытой диссипативной динамической системы, нелинейной, активной, энергетически насыщенной, с непрерывно изменяющимися параметрами. Она существует и эволюционирует в пространстве и времени, на много порядков больших, чем любые эксперименты [Николаев, 2002; Садовский, 2004; Гуфельд, 2007; Геншафт, 2009]. На эту открытую систему и процессы в ней действуют многочисленные внутренние и внешние источники, в том числе хаотические электромагнитные, сейсмоакустические шумы различной интенсивности и цветности. В ней постоянно идут необратимые диссипативные процессы (диффузия, химические реакции, фазовые переходы), существуют комплексы нелинейных взаимодействий между физическими полями, структурами и подсистемами. Кластерная сущность организации ее конденсированной фазы обосновывает системный анализ структур и функционирование сложных эволюционирующих объектов, которые в зависимости от иерархи-

ческого уровня своей организации проявляют свойства детерминированных, стохастических, хаотических и сложных систем. Причем последние характеризуются уникальностью, слабопредсказуемостью и негэнтропийностью, обладая свойствами физичности и моделируемости. При этом сама геосистема является иерархией подсистем, а протекающие в ней процессы имеют кооперативный (коллективный) характер.

Как показано в ряде работ, диссипативные твердотельные структуры, самоорганизующиеся в открытых системах рассматриваемого типа, формирующиеся в условиях диссипации, являются фрактальными. В геосреде происходит много явлений, которые требуют распространение фрактала на сложные структуры с более чем одним показателем скейлинга. Такие структуры могут характеризоваться спектром различных показателей. Фактически мультифрактальность означает, что изучаемый объект (геосреда) состоит из компонент или частей, каждый из которых обладает своими свойствами самоподобия.

Характерные признаки фрактальных структур — самоподобие, масштабная инвариантность, структурная иерархия, фрактальная размерность. Существенно, что многие сигналы, регистрируемые в экспериментах, которые генерируются геосредой, также являются мультифрактальными. При этом такие мультифрактальные процессы тоже допускают разложение на интервалы с различными локальными свойствами скейлинга. Иначе говоря, спектр мультифрактальных процессов не может быть описан степенным законом с одним показателем [Павлов, Анищенко, 2007].

Заметим также, что фрактальные системы, как правило, обладают более высокими удельными излучательными параметрами, чем континуальные среды.

Как известно, один из наиболее содержательных подходов к фрактальному анализу процессов опирается на предположение о том, что процесс порождается динамической системой конечной размерности с хаотическим поведением [Зосимов, Лямшев, 1995]. Понятие фрактала тесно связано с хаосом в динамической системе, причем образ хаоса в фазовом пространстве системы — странный аттрактор — представляет собой фрактал.

У открытых систем с диссипацией фазовое пространство можно упрощенно представить разделенным на области притяжения к различным аттракторам [Кадомцев, 1994]. Как изве-

стно, при переходе к изучению все более сложных систем именно структурные, информационные аспекты их поведения и развития выступают на первый план, а динамика создает лишь основу для такого развития [Кадомцев, 1994]. В ней происходят взаимосвязанные процессы с различными характерными временами, и хаос на одних временах и уровнях самоорганизации обеспечивает упорядоченность на других, причем самоорганизация осуществляется в условиях открытой неравновесной структуры, какой является консолидированная земная кора с включением флюидных систем [Гуфельд, 2007].

Глубинный флюид представляет собой сложную открытую систему, энергетически концентрированную динамическую систему, постоянно меняющую свой состав и свойства.

Проявление колебательных движений в геосреде — одна из форм диссипации энергии. Их спектр характеризует меру энергонасыщенности системы. Наблюдаемые вариации геофизических полей могут интерпретироваться как проявление детерминированного хаоса в иерархически структурированной фрактальной среде.

В последние годы предложены методики, позволяющие выяснить, произведен ли регистрируемый сигнал динамической системой, а также получить информацию о свойствах и характеристиках этой системы. В частности, мерой хаотичности могут служить показатели Ляпунова: если имеются положительные показатели, то поведение динамической системы будет хаотическим [Лоскутов, 2010].

Далее, геосреда — это энергопревращающаяся система: в ней происходит трансформация энергии механической в электромагнитную и сейсмоакустическую, термической в механическую и др.

В рассматриваемом контексте обратим внимание на две важные теоремы. Первая — флуктуационно-диссипативная, связывающая спонтанные флуктуации системы с ее диссипативными свойствами [Ильинский, Келдыш, 1989]. Вторая — S-теорема Климонтовича (аналог H-теоремы Больцмана для открытых систем) — закон уменьшения энтропии Климонтовича [Климонтович, 1999]. По существу, это принцип максимальной диссипации: система без структур может диссипировать такое количество энергии, которое задается микроскопическими процессами диссипации. Если же система со структурой обладает большей диссипацией, то такая структура возникает спонтанно.

Очевидно, при изучении такой сложной динамической системы обычный подход, заключающийся в аналитическом вычислении индивидуальных траекторий дифференциальных уравнений, не работает. Представляется, что всеобъемлющих моделей реальной геосреды, описываемой конечной системой дифференциальных уравнений, просто не существует и, более того, никакая простая модель эту систему — реальную геосреду — полностью никогда не опишет. Поэтому при изучении таких систем используется качественная теория, когда задачей теории является исследование вопросов устойчивости, роли инвариантных многообразий (характеристик), анализ геометрической структуры траекторий, поиск инвариантных мер. Таким образом, в полной мере описание динамики рассматриваемых хаотических систем представляет, вообще говоря, практически неразрешимую сейчас задачу [Лоскутов, 2010]. Но, к сожалению, именно в этой ситуации мы сталкиваемся с проблемой построения адекватной феноменологической модели сейсмического процесса. И не удивительно, что достаточно полные модели глобального сейсмического процесса отсутствуют (seismology is still in preequation state) [Keilis-Borok, 1994].

Проблемными остаются внутриплитовые землетрясения, природа слабой сейсмичности и микросейсмического шума [Гуфельд, 2007; Гуфельд и др., 2011]. Поэтому задача описания сейсмической динамики оказывается необычайно трудной. С этой точки зрения кажется привлекательной попытка построения, прежде всего, феноменологической модели сейсмической активности. Но, высказав, казалось бы, столь привлекательную идею, авторы ограничились лишь построением некоторых частных корреляций, характеризующих сейсмическую активность [Фридман и др., 2010]. Они отмечают, по крайней мере, два класса динамических факторов, определяющих ее динамику в крупных тектонических структурах — глобальный, медленно меняющийся, и локальный, быстро меняющийся. Интерес представляет также обнаруженный или "спокойный" период сейсмической активности, связанной с проведением подземных ядерных взрывов в период с 1957 по 1964 г., в течение которого можно говорить об изменении ее характера в глобальном масштабе.

В. Каган предпринял попытку определения сейсмичности как "турбулентности в земной коре" [Kagan, 1994]. Но насколько удачно такое сравнение? Как известно, исследование турбулентности в ее классическом смысле — од-

на из наиболее сложных, запутанных глав в истории физики. Согласно почти что общепринятым представлениям, турбулентность является процессом хаотическим и в этом смысле такое сравнение неудачно. Однако существуют и иные точки зрения на это явление. Достаточно упомянуть в этой связи подход Колмогорова, математической предпосылкой которого является масштабная инвариантность (скейлинг) уравнений Навье — Стокса относительно замены длины, времени и скорости, и новый взгляд на явление турбулентности, очевидно высказанный впервые Пригожиным (1986), согласно которому переход от ламинарного течения к турбулентному является процессом самоорганизации. Разработана феноменологическая макроскопическая модель стационарно-неравновесной трехмерной турбулентности в сжимаемой жидкости с учетом происходящих в ней нелинейных кооперативных процессов [Колесниченко, 2003]. Разумеется, земная кора (геосфера) весьма не напоминает сжимаемую жидкость. Однако феномен турбулентности явно дает повод к размышлениям и исходные предпосылки для разработки и развития новых идей, касающихся порядка и хаоса, простоты и сложности в поведении открытых нелинейных систем весьма общей природы, которые могут без специфического воздействия извне путем самоорганизации образовывать макроскопические пространственно-временные структуры (осуществлять порядок вдали от равновесия и порядок через флуктуации) [Колесниченко, 2003]. И хотя со времени установления и понимания синергетической природы турбулентности как процесса самоорганизации прошло уже более 30 лет, однако эти новые представления все еще не материализовались в соответствующие разработки подходов, ориентированных на инженерный расчет, не говоря уже об их распространении на макроскопическое описание геосферы, тем более на попытку формулировки замкнутой системы уравнений, описывающих сейсмический процесс. Однако парадигма самоорганизованной критичности — эволюции системы к критическому состоянию — из-за своей фундаментальности оказалась весьма востребованной.

Как известно, суть самоорганизованной критичности состоит в том, что по мере эволюции нелинейной системы она неизбежно приближается к точке бифуркации, ее устойчивость резко падает и в ней создаются условия, при которых слабое внешнее воздействие может спровоцировать лавину — в непредсказуемом мес-

те и с непредсказуемыми последствиями. Тем не менее предполагают, что процесс подготовки сейсмического события порождается типичной системой с самоорганизованной критичностью [Кособоков, 2004; Шаповал, 2011].

Очевидно, в основе такого подхода лежит представление о наличии общих, универсальных свойств открытых сложных систем, откуда, возможно, следует универсальность алгоритмов прогноза поведения динамической системы. Развитие и адаптация соответствующих алгоритмов были осуществлены в Международном институте математической геофизики и теории прогноза землетрясений под руководством акад. В. И. Кейлиса-Борока. В частности, был создан алгоритм прогноза, основанный на накопленных за многие годы наблюдений данных о сейсмической активности — алгоритм M8, предназначенный для прогноза сильных (более 8 баллов) землетрясений. Предприняты попытки его усовершенствования и модификации [Шаповал, 2011]. Сделан вывод о возможности эффективного прогноза в системе с самоорганизованной критичностью, что, очевидно, подтверждает тот вывод, что самоорганизация сейсмического процесса, вообще говоря, согласуется с предсказуемостью сильных сейсмических событий.

Однако результаты опробования этого алгоритма, полученные с 1985 г., оказались не очень успешными так же, как и при попытках прогноза сейсмических событий меньшей балльности. Это обстоятельство наряду со сравнительным анализом предсказуемости в различных моделях сейсмичности послужило дополнительным аргументом в пользу гипотезы о не прогнозируемости систем с самоорганизованной критичностью [Perke, Carlson, 1994].

В итоге мы сталкиваемся с трудным выбором: либо считать сомнительным тезис о самоорганизации сейсмического процесса и предположение о том, что процесс подготовки сейсмического события порождается типичной системой с самоорганизованной критичностью, либо существенно модифицировать гипотезу о непредсказуемости этих систем. Ввиду актуальности проблемы рассмотрим ее более подробно.

Самоорганизованная критичность и прогноз разрушения нагруженных твердых тел.

Как известно, первые представления о сейсмическом процессе, относящиеся к началу прошлого века, всецело основывались на представлениях физики и механики разрушения монолитных образцов горных пород. К концу прошлого века стала очевидной необходимость соз-

дания новой парадигмы для решения этого вопроса, базирующейся на физических закономерностях хрупкого разрушения, возникающего в массивах горных пород [Страхов, 1989]. В настоящее время при численном моделировании напряжений и деформаций крупных тектонических объектов обычно используется тело Кулона—Мора для горных пород в хрупкой части литосферы и тело с нелинейной ползучестью для горных пород в подкоревой литосфере. При этом выбор количественных значений механических параметров для хрупкой части земной коры осуществлялся на основе экспериментальных наблюдений по разрушению малых образцов горных пород, на гипотезе сухой коры или гидростатическом законе распределения флюида по глубине. На протяжении длительного времени описание процесса разрушения твердых тел и пластической деформации развивалось в рамках линейных приближений механики сплошной среды на макромасштабном уровне и физики деформационных дефектов в нагруженном твердом теле (микромасштабный уровень) [Панин и др., 2012]. Однако в последние годы стало очевидным, что, вообще говоря, разрушение твердого тела является диссипативным процессом. При этом деформируемое твердое тело представляет собой многоуровневую иерархически организованную систему, описание которой должно осуществляться в рамках нелинейной механики и неравновесной динамики [Панин и др., 2012]. Было установлено, что любое разрушение твердых тел (и хрупких, и пластических), как и сам сейсмический процесс, является результатом эволюции многомасштабной иерархически организованной нелинейной динамической системы [Макаров, 2011].

Ведущая роль дефектов земной коры как физических механизмов неупругого деформирования и разрушения, происходящих на всем спектре пространственных масштабов, является фундаментом нового научного направления в изучении процессов разрушения образцов горных пород как и явлений, наблюдаемых в сейсмоактивных зонах — физической мезомеханики [Пантелеев и др., 2013]. При этом, как известно, базовыми фундаментальными идеями и физической мезомеханики, и нелинейной динамики являются идеи иерархичности и многомасштабности деформационных процессов.

К сожалению, ключевые проблемы многоуровневой самоорганизации и учета нелинейности иерархически организованной геосистемы весьма слабо разработаны и весьма фраг-

ментарны. Тем не менее в русле этих идей и концепций получен ряд важных результатов. В частности, рассмотрение деформируемого тела как нелинейной многоуровневой системы позволило конкретизировать механизмы формирования локальных зон сильнонеравновесных состояний, в которых реализуются процессы зарождения деформационных дефектов различного масштабного уровня. При этом пластические сдвиги зарождаются в планарных сильно возбужденных подсистемах в виде нелинейных волн канализируемых локальных структурных превращений [Панин и др., 2012].

Особое место в деформационных явлениях занимают деформационные фронты, разнообразные волны повреждений и разрушения [Макаров, 2011]. В рамках этих представлений имеются весоные основания утверждать, что в процесс формирования очага разрушения вносят именно деформационные фронты. При этом начало интенсивной подпитки локальной области деформационными фронтами, очевидно, можно считать режимом обострения и переходом разрушения в катастрофическую стадию. Сам процесс разрушения твердого тела представляет собой последовательность катастроф во всей иерархии масштабов вплоть до макроскопического масштаба образца [Макаров, 2011].

Заметим, что и имеющиеся численные решения демонстрируют наличие двух стадий эволюционного процесса рассматриваемого типа — квазистационарной (сравнительно медленного накопления изменений в нелинейной динамической системе) и катастрофического сверхбыстрого этапа, когда события в системе развиваются в режиме с обострением. Возможна активация разлома деформационным фронтом, распространяющимся вдоль разлома.

В русле этих идей предприняты попытки построения модели подготовки возможного очага разрушения как результата эволюции дефектов геосреды на различных масштабных уровнях. При этом, как и в известной модели лавинно-неустойчивого трещинообразования, возможный очаг не связан с уже существующим разломом, а формируется благодаря коллективному поведению ансамбля дефектов [Пантелеев и др., 2013]. Если же создать условия канализированного распространения трещины (разрыва) и максимально локализовать эффекты диссипации, то этот разрыв будет распространяться как нелинейный волновой процесс [Панин и др., 2012].

Отметим некоторые результаты актуальных с точки зрения понимания эволюции деформи-

руемых твердых тел, полученные в рамках этих теорий, важные с точки зрения приложений. Во-первых, это вывод о том, что все твердые тела (хрупкие и пластичные, в том числе и геосреды), являются динамическими нелинейными системами, обладающими свойством самоорганизованной критичности [Макаров, 2011; Панин и др., 2012]. Традиционный подход феноменологической макроскопической механики разрушения, основанный на макроскопическом масштабе усредненного описания, в принципе, не может решить проблему прогноза разрушения, так как твердые тела и геосреды являются многомасштабными системами.

Имеющиеся численные решения свидетельствуют о наличии двух стадий эволюционного процесса — квазистационарной и катастрофического этапа эволюции, когда события развиваются в режиме с обострением. Фундаментальным свойством эволюции является наличие зон затишья перед катастрофическими событиями. Во-вторых, любое макроскопическое разрушение (катастрофический этап эволюции) является режимом с обострением в соответствующем масштабе. Физически этот режим свидетельствует о переходе разрушения с меньших масштабов на большие [Макаров, 2011]. Начало интенсивной подпитки некоторой локальной области деформационными фронтами предложено считать началом режима обострения. В итоге наличие локальных зон затишья и формирование локализованных диссипативных структур обострения можно считать предвестниками активной стадии формирования очага разрушения, что, по мнению авторов, вселяет определенный оптимизм в проблему прогноза. При этом математическая модель подготовки потенциального очага разрушения, по мнению [Пантелеев и др., 2013], соответствует требованиям новой парадигмы и, по существу, является формализованным обобщением модели лавинноустойчивого трещинообразования [Добровольский, 2009].

Переход к стадии катастрофического роста дефектов имеет резонансную природу и определяется относительно слабыми флуктуациями поля напряжений [Пантелеев и др., 2013].

Тем не менее в рассмотренных моделях все еще остается существенной "лабораторная" компонента представлений о формировании очага. В частности, в них не рассматривается и не конкретизируется физическая природа движущих сил (речь идет лишь о силах тектонической природы), природа слабой сейсмичности, цикличность крупномасштабных разрывов в зем-

ной коре и их воспроизводство (повторяемость) в одних и тех же местах граничных структур, на что справедливо обратил внимание И. Гуфельд [Гуфельд, 2007; Гуфельд и др., 2011]. По его мнению, процессы подготовки очагов сильных сейсмических событий вообще не обусловлены процессами трещинообразования, взаимодействия трещин различного ранга, а обусловлены и связаны особенностями взаимодействия блоков. При этом под очагом сильного сейсмического события понимается связанное состояние нескольких блоков, ограничивающее их взаимное перемещение.

Разумеется, распространение магистрального разрыва может рассматриваться как нелинейный волновой процесс [Панин и др., 2012] в верхних горизонтах земной коры. Однако необходимо принимать во внимание факторы, определяющие процессы на глубинах более 30—50 км, где, вообще говоря, и формируется значительная часть наиболее сильных очагов землетрясений. Очевидно, в этом случае становятся определяющими не процессы взаимодействия трещин различного масштаба, а процессы взаимодействия блоков [Шерман, 2005; Гуфельд, 2007; Гуфельд и др., 2011]. В этом случае крупномасштабные разрывы реализуются в граничных (межблоковых) структурах, играющих, возможно, определяющую роль в тектоническом процессе [Трофименко, 2011].

Предсказуемость и самоорганизованная критичность. Как известно, степенные расщепления и автомодельные свойства сейсмичности типичны для систем, находящихся в критическом состоянии, откуда и делается вывод о том, что процесс подготовки события порождается системой с самоорганизованной критичностью. В частности, А. Шаповал утверждает, что в рамках типичных систем с самоорганизованной критичностью существует и может быть реализована модель сейсмического процесса, "... крупные события которой эффективно прогнозируемы с помощью адаптивных предвестников сильных землетрясений" [Шаповал, 2011]. И далее, что существенно, "... эффективный прогноз землетрясений в реальном времени не противоречит самоорганизованной критичности сейсмического процесса". При этом отмечается, что прогнозируемость построенной таким образом системы оказывается неоднородной во времени. В итоге качество прогноза, вообще говоря, без адаптивной коррекции алгоритмов существенно ухудшается.

Таким образом, здесь сталкиваемся с попыткой улучшения прогнозируемости с помощью

построения универсальных предвестников, опирающихся на свойства модельной динамики. Однако далее следует весьма спорный неожиданный тезис: "подтверждена универсальность методологии прогноза крупных землетрясений анализом последовательности крупных падений наиболее значимых финансовых индексов" [Шаповал, 2011]. Заметим в этой связи, что существует много примеров самоорганизации, но в очень редких случаях разработаны математические модели этих процессов. Однако аргументов, что эти модели и теории как-то непосредственно и очевидно связаны с физикой процесса в реальной геосреде, не так много.

Обратим внимание также на то обстоятельство, что А. Шаповал в качестве модели подготовки рассматривает "модель песка" (sand-pile), при этом правила эволюции модели интерпретируются в терминах сейсмического процесса в надежде на то, что наблюдаемая в конечном счете динамика будет иметь общие черты с реальностью. Разумеется, "куча песка" может рассматриваться в качестве сложной динамической системы, но многие конструкции, построенные "на песке", как известно, весьма неустойчивы. Да и сами "кучи песка" ведут себя совершенно по-разному в зависимости от формы и размера песчинок, и поведение лишь очень немногих из них, как свидетельствует эксперимент, соответствует степенному закону [Хорган, 2001]. Весьма вероятно, что эта модель может оказаться слишком общей и статистической по своей природе, чтобы дать какую-либо физическую трактовку всему многообразию систем, которые она, возможно, описывает, а присущий ей математический формализм во многом подавляет такие тенденции.

Уместно заметить, по собственному признанию П. Бака, самоорганизованная критичность в реальности не является теорией. Она "... не может генерировать ни специфических предсказаний о природе, ни имеющих значение проникновений в суть" [Хорган, 2001].

Рассматриваемый подход к прогнозу сейсмичности не мог не вызвать серьезных возражений. В частности, по мнению И. Гуфельда, в качестве основы работ по прогнозу сейсмичности может выступать лишь понимание физических процессов в литосфере [Гуфельд, 2007, 2013 а, б; Гуфельд и др., 2011].

Задача прогноза динамики системы в критическом состоянии, а в более общем контексте и теория самоорганизованной критичности, как известно, весьма корреспондируется с теорией русел и джокеров, в которой ставятся

и рассматриваются фундаментальные вопросы различной предсказуемости поведения динамических систем в разные моменты времени [Малинецкий, 1998; Малинецкий, Курдюмов, 2001]. Согласно этому подходу, существуют некие "... странные места в фазовом пространстве системы, где предсказуемость является аномально хорошей" [Малинецкий, Курдюмов, 2001]. Эти области в фазовом пространстве, где поведение системы с приемлемой точностью определяется лишь несколькими переменными и появляется возможность предсказания ее поведения на некоторый промежуток времени вперед, и назван авторами руслами. Иначе говоря, там, где вопрос касается русел, сложные системы описываются относительно просто. Кроме того, в фазовом пространстве находятся области, называемые джокерами (областями джокеров, точки бифуркации) с исключительно высокой чувствительностью к малым возмущениям. Русло заканчивается, и количество переменных, которые определяют ход процесса, быстро растет, горизонт прогноза быстро сжимается и появляется возможность быстрых изменений поведения системы. Методы и теории прогноза оказываются эффективными, если они удачно вписываются в свои русла. При подходе к области джокера влияние шумов резко возрастает; может оказаться, что размерность числа степеней свободы системы слишком велика, чтобы выделить в ней динамику. В итоге, очевидно, можно надеяться только на статистические методы прогноза, которые, в свою очередь, могут оказаться совершенно недостаточными для практических приложений.

Следует заметить, что хотя эта теория и менее разработана, чем теория самоорганизованной критичности, она вполне может претендовать на ведущие роли в вопросах прогнозирования динамики сложных систем. В частности, используя концепцию русел и джокеров, можно попытаться сопрячь динамику и статистику [Малинецкий, Курдюмов, 2001]. Однако принципиально важный вопрос о том, как выделять русла, определять, где они начинаются и где заканчиваются, в общем случае остается неясным.

Что же происходит при подходе системы к точке бифуркации, и что говорит по этому поводу теория и свидетельствует эксперимент? Существуют ли предикторы-признаки, указывающие на возможность появления и развития критического процесса? В настоящее время по этим вопросам идет активная дискуссия. Существует мнение, что с точки зрения концепции

самоорганизованной критичности сейсмическое событие (землетрясение) происходит, минуя стадию подготовки, и тем самым закрывается возможность постановки в ее рамках задачи прогноза [Страхов, Савин, 2013 а—в]. В то же время для многих очевидно, что сильные землетрясения происходят в период эндогенного возбуждения довольно большой территории сейсмоактивной области при хотя и весьма небольших, но вполне заметных вариациях параметров среды [Гуфельд, 2007, 2013 а, б]. Система эволюционирует на грани хаоса. Это поведение, называемое слабым хаосом, является результатом самоорганизованной критичности.

Системы с хаосом обладают хорошей пластичностью: реагируя на внешние воздействия, они сохраняют тип ее движений. Ситуация изменяется при приближении к точке бифуркации. В условиях близости к ней растет время релаксации отклонений, т. е. восприимчивость системы, преимущественно ее низкочастотная часть [Руманов, 2013]. По причине высокой восприимчивости системы происходит существенное усиление шума, причем, чем ближе к бифуркации, тем выше и острее низкочастотный пик в спектре шумов системы. Существенно, что в отличие от фликкер-шума, этот пик в спектре шумов исчезает при удалении параметров системы от критических значений.

Напомним, что фликкер-шум или шум мерцания широко распространен в природе, и его присутствие указывает на то, что на динамику системы влияют прошлые события. В системах с фликкер-шумом долгосрочный прогноз поведения системы невозможен [Руманов, 2013]. Теория самоорганизованной критичности дает достаточно общую его интерпретацию: он является суперпозицией сигналов всех амплитуд и длительностей. Белый шум означает отсутствие корреляции между текущей динамикой и прошлыми событиями.

Примечательно, что в условиях стационарного режима движений системы, вдали от бифуркаций, обычно сталкиваются с белым шумом. При приближении к точке бифуркаций растут все его моды, но низкочастотные — в большей степени (эффект резонанса на нулевой частоте). Важно, что упомянутое нарастание низкочастотных (мягких по терминологии Руманова) мод по мере приближения к точке бифуркаций стационарного режима носит универсальный характер. Таким образом, "мягкие" моды могут быть названы предвестниками катастроф. Разумеется, этот диапазон мягких мод у каждой системы свой и чтобы получить пред-

ставление о нем, необходима информация, хотя бы в общих чертах, о физических процессах в изучаемой системе.

Перемежаемость, синхронизация, стохастический резонанс. Другая сторона рассматриваемой проблемы, связанная с попытками описания самоорганизующихся структур в системах, далеких от равновесия, предпринята в теории перемежаемости, представляющей собой непрерывный переход от регулярного движения к хаотическому. Это такой вид стохастических колебаний, при которых сигнал, почти периодический во времени (ламинарная фаза движения), случайным образом сменяется относительно короткими турбулентными всплесками [Копытов, Костенко, 2003]. При этом количество хаотических всплесков может меняться за счет внешних воздействий на систему. Это означает, что перемежаемость представляет непрерывный переход системы от регулярного движения к хаотическому. Однако эта теория объясняет лишь появление относительно длительных ламинарных областей и ничего не говорит об описании самих хаотических всплесков [Копытов, Костенко, 2003]. Но чем чаще в системе происходят изменения, тем ближе она к бифуркации. Замечено, что число хаотических всплесков может существенно меняться за счет внешних воздействий на систему. Однако характеристики хаотического всплеска, в отличие от длительности ламинарной фазы, не зависят от уровня внешнего воздействия на систему и определяются только параметрами нелинейной системы.

Известный пример проявления самоорганизации в динамической системе — синхронизация автоколебаний. С развитием теории динамического хаоса исследования, связанные с различными аспектами синхронизации хаоса, стали приоритетными. Изначально термин синхронизация понимался как явление периодического режима движения под воздействием внешнего гармонического влияния на систему, находящуюся в режиме хаотических автоколебаний (синхронизация через подавление хаоса). Другой тип синхронизации хаоса наблюдается при взаимодействии в некотором смысле идентичных хаотических систем, когда с увеличением связи между ними колебания становятся полностью идентичными (полная синхронизация). Как известно, согласованный режим движения отдельных подсистем сложной системы может быть обеспечен одним из ее элементов, называемым пейсмейкером [Васильев и др., 1979]. Третий тип синхронизации

— синхронизация, индуцированная шумом [Анищенко и др., 1999; Лоскутов, 2010]. В целом синхронизация определяется как сближение некоторых временных масштабов, характеризующих колебания взаимодействующих систем или системы и взаимодействия. Этими масштабами могут быть как характерные времена, которым в спектре колебаний соответствует отчетливо выраженный максимум, так и определенные стохастические характеристики.

Установлено, что переход к синхронному поведению в системах происходит весьма сложным путем (эффекты "пузырения" аттрактора, изрешечивания "бассейнов притяжения" и др.). В сложной иерархической системе, в которой происходят взаимосвязанные процессы с различными характерными временами, и хаос на одних временах и уровнях самоорганизации могут формировать упорядоченность, синхронизацию на других. С. Курдюков и Е. Князева выделяют три основных функции хаоса в процессе самоорганизации:

- хаос как основа при объединении простых структур в сложные;
- хаос необходим для выхода системы на один из аттракторов;
- хаос может выступать в качестве триггера, смены режимов движений системы, перехода от одной относительно устойчивой структуры к другой [Князева, Курдюмов, 2000].

В контексте того, что синхронизация рассматривается в качестве предвестника катастроф, остановимся на двух важных вопросах. Во-первых, чем определяется возможность синхронизации? Прежде всего, поведением каждой подсистемы и силой связи между ними. При этом важно, чтобы связи были глобальными, т. е. существовали не только между соседними блоками (элементами), но и между удаленными друг от друга. Напомним, что образование пространственно-связанной структуры блоков в земной коре в значительной степени определяется интенсивностью и скоростью процессов дегазации и уровнем внешних полей в данный период времени [Гуфельд, 2007, 2013 а].

Следующий актуальный вопрос, как может происходить разрушение синхронизованного состояния? Ответ очевиден: путем ослабления связей или неадекватным воздействием пейсмейкера на ансамбль (внешнего воздействия). Важный методический вывод, вытекающий из этого рассмотрения — в сложных динамических системах необходимо осуществлять мониторинг и контроль на разных иерархических уровнях организации системы. Появляются и

новые возможности в решении задач управления нелинейными динамическими объектами различной природы [Кадомцев, 1994; Гуфельд, 2007; Шуман, 2013 в]. При этом как элемент управления динамическим состоянием твердой фазы геосреды, по мнению И. Гуфельда, может выступать ее флюидная компонента.

Таким образом, важная в прикладном отношении проблема поисков предвестников — исключительно трудна, так как физические механизмы их формирования и генерации неизвестны. В то же время ряд подходов к проблеме может быть заимствован из теории динамических систем и теории катастроф: с приближением к точке бифуркации (событию) происходит аномальный рост флуктуаций и так называемое критическое замедление (понижение частот колебаний), удлинение шкалы времен релаксации, увеличение корреляционных длин и ряд других явлений. Растет восприимчивость системы, преимущественно ее низкочастотная компонента [Руманов, 2013]. Слабый шум не вызывает заметного отклика системы, пока ее параметры далеки от точки бифуркации. Развитие аномальных событий возможно лишь при согласованном поведении различных подсистем иерархической системы. Это не так мало: общие соображения вполне могут служить основой для постановки экспериментальных, в частности, выполнения мониторинговых наблюдений. По крайней мере, они предоставляют новые возможности в исследовании сейсмического процесса и лишают весьма многих иллюзий. Ведь поиск предвестников во многих случаях это, как правило, эмпирика без основания. Вероятно, практический выход здесь состоит не в том, чтобы глубже погружаться в эту эмпирику, а в том, чтобы идти в другом направлении.

Как уже отмечалось, системы на границе хаоса и порядка, на кромке хаоса являются ни в полной мере регулярными и соответственно предсказуемыми, ни в полной мере хаотическими, непредсказуемыми. При этом хаос лежит в основе механизмов объединения относительно простых структур в сложные (синхронизация, индуцированная шумом).

Один из известных примеров поведения нелинейных систем под воздействием шума — эффект стохастического резонанса [Анищенко и др., 1999]. Этот эффект наблюдается в так называемых пороговых системах. Впервые этот термин был введен в модели, предложенной для описания периодичности в наступлении ледниковых периодов на Земле. При этом возможность переходов, переключений была достиг-

нута путем введения некоторой дополнительной случайной силы, индуцирующей переходы через потенциальный барьер.

Очевидно, и качественные, и количественные его закономерности во многом определяются и зависят от типа системы и режима ее функционирования. Установлено, что этот эффект может быть существенно усилен в ансамбле по сравнению с отдельным бистабильным элементом системы, а ансамбль стохастических резонаторов демонстрирует эффект стохастической синхронизации при сколь угодно слабом внешнем периодическом сигнале [Анищенко и др., 1999, с. 36].

Заметим, что существует целый спектр явлений. Это стохастический резонанс, динамический резонанс, виброиндуцированный резонанс, шумоиндуцированные переходы, синхронизация под действием внешней периодической или случайной силы, авторезонанс как "резонанс" под действием силы, порожденной самой системой, и другими эффектами [Анищенко и др., 1999; Лоскутов, 2010].

О формировании локальных зон сильнонеравновесных состояний. Сделаем попытку конкретизации некоторых положений теории подготовки и процессов сейсмических событий. Как уже упоминалось, традиционный критерийный подход феноменологической макроскопической механики разрушения, базирующийся на макроскопическом масштабе усредненного описания геосреды, не решает проблему физики и механики разрушения [Макаров, 2011]. Рассмотрение геосреды как многоуровневой иерархически организованной системы, которая описывается в рамках нелинейной механики и неравновесной термодинамики, существенно расширяет возможности такого описания, в частности конкретизации механизмов формирования локальных зон сильнонеравновесных состояний, в которых зарождаются деформационные дефекты различного масштабного уровня [Панин и др., 2012]. Тем не менее динамическое поведение геосреды очевидно нельзя описать только в рамках представления механики разрушения. Весьма вероятно, что процессы подготовки очаговых зон не обусловлены всецело процессами взаимодействия трещин различного ранга, а связаны с особенностями взаимодействия блоков [Гуфельд, 2007, 2013 а, б; Гуфельд и др., 2011].

Согласно И. Гуфельду, важная особенность литосферы — быстрые и разномасштабные вариации объемно-напряженного состояния, которые трактуются как реакция среды на взаи-

модействие восходящих потоков легких газов с твердой фазой [Гуфельд, 2007, 2013 а, б]. Существенно, что такая насыщенная геосреда допускает проявление процессов, которые оказываются невозможными в других условиях. Плотность восходящих потоков меняется в пространстве и времени. При этом сток легких газов из разнесенных по глубине зон деструкции блоковых структур в межблоковые зоны быстро меняет сейсмотектоническую ситуацию [Гуфельд, 2013 а, б]. Легкие газы (гелий, водород) могут аккумулировать значительную энергию путем восхождения в жидкие и твердые растворы, кластерные структуры [Вол, Гилат, 2006]. Декомпрессия разломной зоны под воздействием внешних факторов вызывает взрывной распад соединений гелия и водорода. Энергия дегазации обладает высокой плотностью, быстро концентрируется и высвобождается с высокой скоростью и так же быстро снова накапливается. В итоге фактически можно говорить о режиме деформационной волны, распространяющейся в направлении потока легких газов. На скорость восходящего потока легких газов активное влияние оказывают также лунно-солнечные приливы, волны удаленной сейсмичности, геологические особенности среды — блочные, межблочные и разрывные структуры различного ранга [Гуфельд, 2007, 2013 а, б]. При этом формирование крупномасштабных структур разрушения связывают с неконтролируемым стоком водорода и гелия в межблоковые области. Такова физическая сторона проблемы, получившей наиболее последовательное описание в работах [Гуфельд, 2007; Гуфельд и др., 2011; Гуфельд, 2013 а, б]. Обратимся далее к ее феноменологическому аспекту.

Как уже отмечалось, геосреда как нелинейная диссипативная динамическая система может характеризоваться в фазовом пространстве (пространстве состояний) несколькими аттракторами, характеризующимися определенной областью (бассейном) притяжения. Как известно, аттракторы являются с формальной точки зрения образом как автоколебаний, так и автосолитонов — собственных стационарных уединенных состояний [Кернер, Осипов, 1989]. Так как геосистема характеризуется несколькими аттракторами в ее конфигурационном пространстве, в ней могут образовываться автосолитоны различного вида и формы.

Как известно, автосолитоны могут возникать в системах, неравновесность которых определяется величиной потока (теплового, в частности обусловленного и процессами дегазации). Для

возбуждения автосолитона на систему необходимо подать локализованное возмущение достаточно большой амплитуды и длительности. В зависимости от вида возбуждающего локального возмущения и параметров системы в ней можно возбудить статические, пульсирующие, бегущие автосолитоны, а также другие более сложные уединенные автосостояния, в частности локализованные диссипативные структуры обострения.

Напомним, что современные исследования свидетельствуют о том, что землетрясения обнаруживают признаки динамических нелинейных многоуровневых систем, включая пространственно-временную локализацию, автономность, миграцию активности по системам разломов земной коры. При этом отклик геосреды на внешнее воздействие на микроуровне определяется эволюцией ее внутренней структуры во всем спектре масштабов. Не исключено, что ряд особенностей сейсмического процесса, в частности природа слабой сейсмичности, образование крупномасштабных разрывов в земной коре, их воспроизводство, могут найти объяснение в рамках изложенных представлений. Действительно, если попытаться истолковать сейсмическое событие как автоструктуру большой амплитуды (локализованной диссипативной структуры обострения), формирующийся за счет внешнего влияния (водородной дегазации, контролирующей основные параметры структуры блоков и процессы в межблоковых структурах) и специфических свойств шумов в системе, такой подход представляется довольно естественным.

Итак, чтобы возбудить в геосреде автосолитон, возбуждающее его локализованное пространственно-временное возмущение (импульс дегазации) должно обладать энергией, достаточной для перевода системы в состояние, отвечающее области притяжения аттрактора (в частности, странного аттрактора), соответствующего данному типу возмущения. Тогда в системе после прекращения действия этого внешнего источника происходит самопроизвольное формирование автосолитона или локализованной диссипативной структуры обострения. При этом в зависимости от параметров системы в ней может быть реализован мягкий или жесткий режим возбуждения автоструктур. При мягком режиме, когда амплитуда возбуждающего импульса остается ниже некоторого порогового значения, образуются автоструктуры малой амплитуды, а при жестком, когда амплитуда импульса возбуждения превышает этот порог, — возникновение автоструктур большой амплитуды.

Заметим, что слабый хаос — это продукт реализации мягкого режима возбуждения автоструктур. Известно также, что в активных системах внешнее воздействие неизбежно сопровождается хотя бы слабым шумом. Приобретают важное значение методы диагностики эффектов стохастического резонанса и синхронизации хаоса. В частности, для нелинейных диссипативных систем с хаотическими аттракторами в режиме индуцированных шумом переходов интенсивность периодических компонент спектра сигнала, воздействующего на систему, достигает максимального уровня при некотором оптимальном уровне шумов в ней. Соответственно возможна реализация режима достижения порога переключения системы с одного бассейна притяжения аттрактора в бассейн другого, в частности аттрактора разрушения. Такова в общих чертах суть проблемы. Это как раз тот физический аргумент, которого недоставало в существующих теориях подготовки и реализации крупномасштабного разрыва в межблоковой структуре.

В случае неоднородных сред следует подчеркнуть фундаментальную роль механических жестких образований (блоков), которые являются источниками бегущих автоволн — пеймейкеры. Предполагается, что непосредственно перед появлением крупномасштабного (магистрального) разрыва в геосреде образуется специфическая структура, состоящая из нескольких прочных областей (блоков) и области сдвиговой ползучести. Это состояние называют предразрушением. Имеются основания считать, что в процессе формирования крупномасштабного разрыва значительный вклад вносят деформационные фронты, сопровождающиеся декомпрессией и взрывной дегазацией. При этом начало интенсивной подпитки некоторой локальной области деформационными фронтами можно считать началом режима обострения. Очевидно, это состояние можно рассматривать в качестве физико-механической основы существования и проявления предвестниковых процессов. Как известно, в качестве таковых могут служить, в частности, процесс нарастания мелких (низкочастотных) мод в спектре шумов системы или эффекты потери мультифрактальности в динамике геосистем [Любушин, 2011; Руманов, 2013].

В заключение раздела обратимся к еще одной важной стороне проблемы — воспроизводимости крупномасштабных разрывов в одних и тех же структурах. Можно предположить, что с формальной феноменологической точки зрения этот процесс ассоциируется с процессом

возвратов Пуанкаре. Как известно [Анищенко, Астахов, 2013], возвращаемость по Пуанкаре означает, что любая фазовая траектория системы, начинающаяся в некоторой точке фазового пространства, с течением времени бесконечное число раз пройдет сколь угодно близко от этой точки, что, по сути, является отражением динамики системы во времени.

Задачи реконструкции и прогноза. Временные ряды. Как известно, задача получения динамического описания нелинейных систем с хаотическим поведением по экспериментальным данным становится в последние годы все более актуальной в связи с необходимостью предсказания их поведения [Некоркин и др., 2008; Лоскутов, 2010; Любушин, 2011; Чернавский и др., 2011; Дубовиков, Старченко, 2011 и др.].

Эта задача при экспериментальных исследованиях обычно реализуется посредством обработки регистрируемых сигналов, произведенных системой. Прогноз по временным рядам — одно из важных направлений приложения результатов теории динамических систем к решению практических задач. При этом же сразу возникает ряд принципиальных вопросов. В частности, можно ли только на основании анализа временного ряда как функции времени сделать вывод, произведен ли он динамической системой или это случайный шумовой процесс. Если же это динамическая система, то что можно сказать о ее свойствах и характеристиках: сколько переменных необходимо для задания ее состояния и можно ли предположить модель, которая позволила бы адекватно воспроизвести наблюдаемую временную зависимость и прогнозировать будущее состояние системы. Очевидно, наличие только лишь временного ряда сильно ограничивает возможность получения информации об изучаемой системе. Разнообразие специфических ситуаций, шумы и нестационарности предопределили появление несколько подходов к их анализу. Одни развивались в русле математической статистики и спектрального анализа, теории информации и нелинейной динамики [Некоркин и др., 2008; Лоскутов, 2010; Дубовиков, Старченко, 2011], в других поиск решения задачи шел на путях реализации концепции русел и джокеров, где выделяются области детерминированного (русло) и случайного (джокера) поведения рассматриваемого хаотического ряда [Малинецкий, Курдюмов, 2001]. А. Любушин рассматривал поиск предвестников сильных землетрясений как эффектов увеличения синхронизации (когерентного поведения) скалярных компонент много-

мерных временных рядов систем мониторинга [Любушин, 2011]. При этом он исходил из статистически значимого уменьшения среднего значения ширины носителя мультифрактального спектра сингулярности.

Предполагается, что наблюдаемый временной ряд генерируется неизвестной хаотической системой, которая и определяет его динамику. При этом особое внимание уделяется нерегулярным сигналам, которые выступают в качестве индикаторов типичности хаотического поведения изучаемой нелинейной динамической системы. К настоящему времени разработан ряд методов такого прогноза, которые подразделяются на два основных типа — локальные и глобальные [Лоскутов, 2010]. Эта классификация проводится по области определения параметров аппроксимирующей функции, рекуррентно устанавливающей последующие значения временного ряда по предыдущим. В глобальных методах на основе статистического анализа используются авторегрессия, скользящее среднее. Локальные методы основаны на локальной аппроксимации ряда. Ее применение не требует априорной информации о динамической системе, которая порождает временной ряд. Однако длина обрабатываемого ряда должна быть достаточно большой, а его шумовая компонента — малой. Разработаны эффективные подходы для преодоления этих трудностей. В частности, один из них, позволяющий исследовать зашумленные ряды относительно небольшой длины, основан на сочетании сингулярного спектрального анализа и локальной аппроксимации [Лоскутов, 2010].

В отличие от перечисленных методик анализа, в которых временные ряды обрабатываются "непосредственно", существует и "опосредованный" подход, в котором по исходным временным рядам формируются некие "предсказательные" математические модели и прогноз осуществляется по их свойствам.

Заметим, что современный подход к обнаружению динамических закономерностей из экспериментальных данных (временных рядов) основан либо на дискретных моделях, которые описываются разностными уравнениями, либо на непрерывных моделях, описываемых обыкновенными уравнениями. Существенно, что теорема Такенса подготовила почву для построения алгоритмов предсказания поведения системы с использованием сведений о динамической природе наблюдаемого временного ряда [Лоскутов, 2010]. При этом на основании исследования временных рядов наблюдаемых мож-

но отличить случайное, стохастическое поведение системы от детерминированного хаоса, установить размерность аттрактора, другие ее инвариантные характеристики. Этот аспект является очень важным для приложений, поскольку он позволяет установить природу экспериментально полученного сигнала [Лоскутов, 2010], т. е. генерируется динамической системой или же является шумовым.

Разумеется, при решении задач прогнозирования динамики сейсмической активности одной из важнейших предпосылок адекватности моделей является рассмотрение результатов моделирования в непосредственном контакте с геосредой, в которой развивается реальный сейсмический процесс. Если такой анализ возможен, тогда аппарат нелинейной динамики превращается в мощный инструмент исследования возможностей прогноза и, возможно, поиска путей к управлению динамикой системы посредством внешних воздействий [Гуфельд, 2007; Шуман, 2011 а, б; 2013 а, б].

Комментарии и обсуждение. Конкретизируем некоторые общие положения теории сейсмичности и подведем некоторые итоги.

Весьма привлекательная идея построения феноменологической модели сейсмичности аналогична тому, как термодинамика в свое время была построена значительно ранее статистической физики, высказанная в работе [Фридман и др., 2010], весьма проблематична. Как известно, термодинамика только на первый взгляд является феноменологической. В действительности она может быть построена на базе статистической физики, представляющей собой специфическую разновидность динамики [Кадомцев, 1994].

Определение сейсмичности как "турбулентности" в земной коре, данное Каганом [Каган, 1994], также являются весьма спорными. Согласно почти что общепринятой точке зрения, турбулентность является процессом хаотическим. Но существуют и другие представления. Как уже упоминалось, начиная с работ Рейнольдса, предполагалось, что турбулентность в жидкостях и газах может быть полностью описана в рамках уравнений Навье—Стокса. Это означало, что турбулентность трактовалась как автоколебательный процесс. При этом автоколебания в сплошной среде связывались с большим числом степеней свободы системы. Позднее, в 1970-х годах прошлого века, в связи с открытием динамического хаоса стал приобретать популярность взгляд на турбулентность как скачкообразное возникновение в фазовом

пространстве системы странного аттрактора, т. е. с возбуждением автоколебаний в динамических системах. Однако дальнейшие теоретические разработки не подтвердили тезиса о появлении турбулентности как автоколебательно-го явления [Ланда и др., 2009]. По мнению этих авторов, мифом является и описание перехода от ламинарного течения к турбулентному как возбуждение автоколебаний, а существование подобных структур (аттрактора) является еще одним из мифов.

Таким образом, следует различать турбулентность и динамический хаос: последний является общим свойством динамических систем с размерностью больше двух, в то время как турбулентность — частный пример случайных волн [Ланда и др., 2009].

Находясь в рамках общей теории сложных динамических систем, изучение свойств геосреды, кластерной сущности ее организации, как и их мониторинг, ограничены и доступны лишь отчасти. Основные задачи нелинейно-динамического подхода заключаются в выработке на основе геофизических и других данных адекватных динамических образов ключевых явлений, происходящих в геосистеме, построенные на их основе базовых моделей и исследование динамики этих моделей. Однако развитие нелинейно-динамического подхода применительно к геосреде сталкивается со значительными трудностями, связанными с ее необычностью и сложностью. Ее свойства лишь отчасти известны и достоверны для понимания.

Установлена возможность существования принципиально различных — регулярных и стохастических — режимов развития сложной динамической системы. Фундаментальное свойство эволюционных процессов в них — это наличие двух стадий — квазистационарной (сравнительно медленного накопления изменений) и сверхбыстрого этапа эволюции (режим с обострением).

Обнаружено, что сложное пространственно-временное поведение распределенных сред с очень большим числом степеней свободы может быть адекватно описано нелинейными системами небольшой размерности. Однако вся сложность в поведении динамических систем заключается в существовании множеств (возможно, меры нуль) траекторий, сильно влияющих на их динамику и пути развития. Такая точка зрения, игнорирующая рассмотрения редких траекторий, принята в эргодической (метрической) теории динамических систем [Лоскутов, 2010]. В поведении слабохаотических систем (эволюционирующих на грани хаоса), в

отличие от полностью хаотических, отсутствует временной масштаб (горизонт прогноза), выход за пределы которого практически невозможен.

Переменяемость — характерное свойство динамических систем весьма различной природы, при этом сигнал, генерируемый системой, представляет собой чередующуюся последовательность регулярных фаз и хаотических всплесков. Режимы переменяемости экспоненциально чувствительны к внешнему шуму. К сожалению, эта теория ничего не говорит об описании хаотических всплесков при смене ламинарного режима хаотическим.

Вполне вероятно, что модель самоорганизованной критичности может оказаться слишком общей и статистической по своей природе, чтобы дать физическую трактовку многообразию систем, которые она признана описать. Несомненно, устойчивое состояние существует, но область (бассейн) притяжения траекторий системы непрерывно меняется [Руманов, 2013, с. 41]. Сильная нелинейность разрушает фазовую структуру пространства. Процессы в таких распределенных системах развиваются на множестве пространственно-временных масштабов, при этом их свойства зависят от их состояния, а процессы весьма разнообразны. В этой связи можно упомянуть такие явления, как стохастический и динамический резонансы, виброиндуцированные режимы, шумоиндуцированные переходы, синхронизацию под действием внешних периодических сил, авторезонанс [Лоскутов, 2010]. В такой сложной ситуации тезис о принципиальной непредсказуемости тем не менее нуждается в уточнении. В частности, проблема прогноза может рассматриваться как задача исследования отклика системы на многочастотные и шумовые сигналы внешнего и внутреннего происхождения. Статистический подход в принципе не позволяет реализовать краткосрочный прогноз. Трудности кратковременного прогноза во многом связаны с наличием шумов в геосреде. Шум может индуцировать новые режимы ее функционирования. Один из наиболее ярких примеров указанного типа — эффект стохастического резонанса, который в зависимости от свойств сигнала, шума и конкретных параметров системы будет характеризоваться весьма специфическими свойствами. В частности, стохастический резонанс может быть существенно усилен в ансамбле по сравнению с отдельным элементом системы [Анищенко и др., 1999]. Он может интерпретироваться в качестве фундаментального порогового эффекта. Особый интерес представляет случай, когда по-

следовательность случайных событий, когда сумма регулярной и шумовой компонент сигнала, действующего на систему, превышает (пересекает) некий заданный пороговый уровень. Всякий раз, когда уровень порога пересекается в одном направлении, генерируется событие. Сам процесс пересечения порога порождает во времени случайную их последовательность.

При экспериментальных исследованиях изучение поведения систем обычно осуществляется посредством соответствующей обработки сигналов, генерируемых систем [Лоскутов, 2010]. В частности, именуемые методы анализа временных рядов (наблюдаемых) позволяют во многих случаях реализовать на практике известные результаты теории динамических систем для получения таких характеристик, как показатели Ляпунова и размерность. Задача прогноза в общем случае ставит своей целью определение каких-либо качественных и количественных параметров будущего поведения временного ряда на основе всего массива данных. При этом особый интерес представляет задача определения ранних предвестников критического поведения ряда. На основе индекса фрактальности выявлен эффект увеличения крупномасштабных колебаний при подавлении мелкомасштабных. Известный эффект затишья в сейсмологии — частное проявление указанного эффекта [Дубовиков, Старченко, 2011]. Мультифрактальность можно рассматривать как достаточно общее явление. В последние годы наличие мультифрактальности или сложного скейлинга в структуре сейсмичности широко дискутируется [Любушин, 2011, 2013]. Новый взгляд на проблему исследования сложных сигналов — мультифрактальный анализ, основанный на непрерывном вейвлет-преобразовании, базисные функции которого хорошо локализованы [Дремин и др., 2001]. Приобрел популярность метод максимумов модулей вейвлет-преобразования (ММВП).

Однако, несмотря на имеющиеся весомые аргументы в пользу стадии подготовки критических событий и принципиальной возможности ее экспериментального обнаружения, следует признать, что ожидаемые преимущества и эффективность все еще остаются нереализованными. Эта плодотворная на первый взгляд идея извлекать динамику непосредственно из данных наблюдений (временных рядов) наталкивается на существенное препятствие — ограниченность, неполноту и зашумленность экспериментальных данных. Поиски предвестников все еще связаны с эмпирикой без должного теоретического основания.

В рассматриваемом контексте обратим внимание еще на одно важное обстоятельство: в физических системах рассматриваемого типа при изменении какого-либо параметра до определенного уровня (значений) часто отсутствует предел, т. е. предельное значение зависит от того, с какой стороны происходит переход к пределу. Как известно, именно этим можно объяснить возможность хаотических решений в динамических системах (согласно теореме единственности такие решения невозможны) [Ланда др., 2009]. В итоге экспериментальные данные часто не позволяют дать однозначную трактовку наблюдаемым явлениям, т. е. создать адекватную теорию, основанную исключительно на этих данных.

Остаются нерешенными проблемы описания динамики фрактальных сред, связи дискретных и непрерывных моделей геосистем. Важно также заметить, что все изученные системы прогнозируемы благодаря их колебаниям вокруг критической точки [Шаповалов, 2011].

Одной из важнейших характеристик равновесия в системе является восприимчивость. Критические явления обусловлены восприимчивостью [Руманов, 2013]. Синхронизация означает приближение к сильному событию. Слабый шум не оказывает заметного влияния на поведение системы до тех пор, пока ее параметры далеки от точки бифуркации. При подходе к ней из-за высокой восприимчивости наблюдается резкое усиление шума: происходит нарастание низкочастотных ("мягких") мод в спектре шумов системы [Руманов, 2013].

Разумеется, проще и безопаснее проблему прогноза считать нерешаемой и некорректной, а рассмотренные выше конструкции, несмотря на их теоретическую обоснованность и экспериментальное (хотя и ограниченное) подтверждение, экзотическими и трудно реализуемыми. Вообще говоря, сегодня эта проблема может рассматриваться как реальность в ее норме, так и воплощение иллюзий весьма широкого спектра. Тем не менее постановка и подходы к ее решению кажутся вполне естественными. Сегодня уже имеется положительный, хотя и ограниченный опыт такого прогноза [Любушин, 2011; Страхов, Савин, 2013 а—в]. Очевидно, здесь мы имеем дело с рождением нового раздела физики, посвященного изучению новых динамических свойств систем различной физической природы и масштабов, не зависящих от типа среды или системы, в которой осуществляется эта динамика. Оно включает исследование сложных сред, процессов, явлений

и систем, характеризующихся пространственной и временной нелокальностью, немарковской динамикой, фрактальностью структуры и ее нецелой топологической размерностью.

Ввиду сложности объекта исследований (геосреды и процессов в очаге готовящегося события, разворачивающихся на множестве пространственно-временных масштабов) требуются и специфические методы мониторинга на разных иерархических уровнях его организации. Очевидно, помимо классических пассивных методов, он должен быть дополнен активным, в частности исследованием отклика системы на многочастотные и шумовые сигналы внешнего и внутреннего происхождения. При этом в качестве первоочередного являются задачи определения восприимчивости системы и меры ее синхронизации (ширины спектра сингулярности), исследование режимов перемежаемости, структуры сигналов, воздействующих на систему, динамики спектра ее шумов, определение ранних предвестников критического поведения рядов наблюдений. Критически важное значение имеет также выбор модели, система сбора информации и ее последующей обработки, где особенно проявляются ограничения технического и экономического характера. Однако трудности и формализм в существующих и разрабатываемых методах прогноза не должен довлеть над физическим содержанием проблемы или подавлять его. Однако в любом случае весьма сложно согласиться с одним из уже упоминавшихся положений Решения Российского экспертного совета (РЭС) от 23 декабря 2012 г., приведенное в работе [Страхов, Савин, 2013 а—в], о вторичности или даже вредности теории в объяснении экспериментальных фактов. Ситуация представляется совершенно иной: изложенные соображения, в принципе, позволяют формализовать весьма непростые взаимоотношения между экспериментом (в частности, мониторингом) и прогностической моделью в рамках концепции нелинейной динамики. Существенно, что исследуя только экспериментальные данные (временные ряды — сигналы, генерируемые системой), можно отличить случайное, стохастическое поведение системы от детерминированного хаоса и в отдельных случаях предсказывать дальнейшую ее эволюцию. В то же время с позиций нелинейной динамики стало очевидным, что задача прогноза является значительно сложнее, чем это представлялось ранее, и зачастую не укладывается в рамки, предоставляемые теорией.

Обратим внимание еще на одно важное обстоятельство. Ряд исследователей полагает, что весьма полную информацию о свойствах граничных структур и динамике блоковой системы литосферы вполне вероятно получить на основе анализа микросейсмического шума, возбуждаемого за счет восходящих переменных потоков легких газов (водород, гелий и др.) [Гуфельд и др., 2011]. Разумеется, сейсмические методы при этом вполне обоснованно считаются и остаются ведущими в исследовании глубинной структуры и изменений параметров геосреды. Заметим, что геометрический шум литосферного происхождения — это универсальный эффект, он обусловлен только наличием диффузии и может проявляться при генерации возмущений различной природы, в частности и электромагнитных флуктуаций. Очевидно, с этой точки зрения разграничивать или противопоставлять между собой сейсмоакустическую и электромагнитную эмиссии литосферы представляется обоснованным.

Как известно, одна из моделей описания флуктуаций сейсмоакустической и электромагнитной эмиссии в процессе перестройки структуры пород под действием восходящих потоков легких газов связана с перколяционной моделью диффузионного фронта. Известно также, что проявление свойств перколяционного типа весьма вероятно в материалах с низкой проницаемостью и в трещиноватых породах [Гийон и др., 1991]. В итоге модель фронта градиентной скалярной перколяции позволяет дать физическую интерпретацию наблюдаемых параметров высококачественного сейсмического шума и спонтанной электромагнитной эмиссии как неравновесного самоорганизованного критического явления. Однако, к сожалению, спонтанная электромагнитная эмиссия литосферного происхождения, в отличие от сейсмической, весьма зашумлена электромагнитными возмущениями магнитосферно-ионосферно-атмосферного происхождения, что накладывает существенные ограничения на ее использование при мониторинговых наблюдениях и требует специальных методических приемов для ее выделения. Однако, несмотря на технологические трудности теоретического описания, компонента спонтанного электромагнитного шума литосферы дает уникальные возможности получения информации об электродинамических свойствах геосреды, ее состоянии и динамике [Шуман, 2013 в].

Заключение. Как известно, дискуссия о возможности прогноза и прогнозируемости сейсмичности опирается на представление о сейс-

мическом процессе как эволюции системы литосферных блоков различной величины с самоподобной структурой и, соответственно, геосреды как активной нелинейной динамической системы. В общем случае эти вопросы могут интерпретироваться как задача изучения отклика этой системы (геосреды) на многочастотные и шумовые сигналы различного происхождения. Их сложность, очевидно, обусловлена сложностью самой исследуемой системы и многофакторностью действия на нее физических полей. В этом смысле задача нелинейно-динамического подхода применительно к прогнозу, прогнозируемости и построению ее феноменологической модели может быть сформулирована как разработка адекватных моделей динамических образов явлений и особенностей сейсмического процесса в геосреде на основе данных о мониторинге сигналов, генерируемых системой, и исследование динамики этих моделей. При решении этого круга задач возникают важные и трудные проблемы соотношения теории и эксперимента. В частности, экспериментальные (мониторинговые) данные в силу разных причин (ограниченность, несистематичность, зашумленность, трудности доступа и др.) часто не позволяют дать однозначную трактовку наблюдаемым явлениям и соответственно ставить задачу создания адекватной теории, основанной на этих данных. Проблемными остаются вопросы описания динамики фрактальных сред, связи дискретных и непрерывных моделей геосреды с нелокальностями степенного типа.

Тем не менее, проблема не выглядит безнадежной. Оптимизм, очевидно, может ассоциироваться с тем, что сложное пространственно-временное поведение распределенных систем с очень большим числом степеней свободы, когда извлечение нелинейной динамики весьма затруднительно или невозможно, в некоторых случаях может быть адекватно описано нелинейными системами относительно небольшой размерности.

Как известно, возможность прогноза и прогнозируемость базируются на осознании и убежденности типичности хаотического поведения нелинейных динамических систем. При этом теория предоставляет нам весьма небольшое число универсальных сценариев перехода от порядка к хаосу, т. е. переходам исследуемой системы в ее фазовом пространстве из области русел в область джокера. Установлено существование стадии (фазы) подготовки сейсмических событий. С приближением к событию (порогу) происходит аномальный рост флуктуаций и так называемое критическое замедле-

ние, т. е. понижение частот колебаний некоторых мод, удлинение шкалы времен релаксации, удлинение корреляционных длин, эффекты синхронизации, индуцированные шумом переходы, один из ярких примеров которых является стохастический резонанс.

При отсутствии теории эти весьма общие и универсальные соображения могут рассматриваться в качестве минимальной основы или предпосылки для постановки экспериментальных работ, в частности мониторинговых наблюдений. Как свидетельствуют теория и эксперимент, предвестниковые проявления присущи сейсмичности. Статистический подход к ее прогнозу не может считаться более предпочтительным, чем исследование физики процесса, его динамического видения. Теория русел и джокеров, в принципе, позволяет сочетать динамику со статистикой. Тем не менее следует признать, что хотя приведенные аргументы в пользу присутствия стадии подготовки и выглядят весьма весомо и убедительно, их ожидаемые преимущества пока не реализованы в должной мере. Очевидно, при этом наиболее значимым применением теории сложных нелинейных иерархических систем является прогнозирование динамики порождаемых ими сигналов (рядов наблюдений). В русле рассматриваемых идей обратим внимание на фундаментальное значение флуктуационно-диссипативной теоремы, связывающей спонтанные флуктуации системы с ее диссипативными свойствами, и S-теоремы (закон уменьшения энтропии) Климонтовича. И, наконец, вопросы прогнозируемости рассматриваемых сложных динамических систем могут быть отнесены к междисциплинарным, включающим ряд направлений физики, математики, информатики, геофизики и их весьма деликатном взаимодействии.

В заключение, предпримем попытку в сжатой форме резюмировать вышеизложенное.

Очевидно, можно утверждать, что стадия перехода к джокеру или, точнее, режиму экспоненциальной (взрывной) неустойчивости геосистемы удовлетворяет в некоторой отдельной пространственной ее части своеобразному принципу минимального производства энтропии за счет резкого снижения скорости диссипации поступающей энергии в результате образования пространственно связанной структуры блоков и когерентности колебательных волновых процессов, протекающих на разных масштабных уровнях системы — геосреды. В итоге можно говорить о своеобразном нарушении второго начала термодинамики, согласно которому все процессы в макромире сопровождаются возрастанием энтропии — меры хаоса и беспорядка.

Наиболее радикальным и, возможно, эффективным решением проблемы снижения сейсмической опасности является разработка методов контролируемого воздействия на эту стадию с целью ее разрушения на относительно раннем, начальном этапе ее развития. В этом контексте исследование сейсмоакустических и электромагнитных шумов в системе имеет критически важное значение, также позволяет, в принципе, диагностировать приближение этой особой стадии ее развития, эволюции. В частности, эта цель может быть достигнута по нарастанию низкочастотных (мягких) мод в шумовых полях [Руманов, 2013], выявлении скрытых признаков роста их синхронизации [Любушин, 2011], анализе кооперационных взаимодействий элементов геосреды на различных ее масштабных уровнях [Пантелеев и др., 2013]. Существенно, что эти признаки носят универсальный, всеобщий характер.

Список литературы

- Анищенко В. С., Астахов С. В. Теория возвратов Пуанкаре и ее приложения к задачам нелинейной физики. *Успехи физ. наук*. 2013. Т. 183. № 10. С. 1009—1028.
- Анищенко В. С., Нейман А. Б., Мосс Ф., Шимановский-Гайер Л. Стохастический резонанс как эффект увеличения степени порядка. *Успехи физ. наук*. 1999. Т. 169. № 1. С. 7—38.
- Васильев А. Н., Романовский Ю. М., Яхно В. Г. Автоволновые процессы в распределенных кинетических системах. *Успехи физ. наук*. 1979. Т. 128. Вып. 4. С. 625—666.
- Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2003. 150 с.
- Вол А., Гилат А. Первичные водород и гелий как источники энергии землетрясений. В кн.: *Генезис углеводородных флюидов и месторождений* (Отв. ред. А. Дмитриевский, Б. Валяев). Москва: ГЕОС, 2006. С. 160—166.

- 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. Т. 161. № 10. С. 121—128.
- Гуфельд И. А. Возможен ли прогноз сильных коровых землетрясений. *Вестник РАН*. 2013 а. Т. 83. № 3. С. 236—245.
- Гуфельд И. А. О глубинной дегазации и структуре литосферы и верхней мантии. *Электрон. журн. "Глубинная нефть"*. 2013 б. Т. 1. № 2. С. 172—188.
- Гуфельд И. А. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Научное издание. Королев: ЦНИИМаш, 2007. 160 с.
- Гуфельд И. А., Матвеева М. И., Новоселов О. Н. Почему мы не можем осуществить прогноз сильных коровых землетрясений. *Геодинамика и тектонофизика*. 2011. Т. 2. № 4. С. 378—415.
- Добровольский И. П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. Москва: Физматлит, 2009. 240 с.
- Дремин И. М., Иванов О. В., Нечитайло В. А. Вейвлеты и их использование. *Успехи физ. наук*. 2001. Т. 171. № 5. С. 465—501.
- Дубовиков М. И., Старченко Н. В. Эконофизика и фрактальный анализ финансовых временных рядов. *Успехи физ. наук*. 2011. Т. 181. № 7. С. 779—786.
- Зосимов В. В., Лямшев А. М. Фракталы в волновых процессах. *Успехи физ. наук*. 1995. Т. 165. № 4. С. 362—402.
- Ильинский Ю. А., Келдыш Л. В. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом. Москва: Изд-во МГУ, 1989. 304 с.
- Кагомцев Б. Б. Динамика и информация. *Успехи физ. наук*. 1994. Т. 164. № 5. С. 449—530.
- Кернер Б. С., Осипов В. В. Автосолитоны. *Успехи физ. наук*. 1989. Т. 157. № 2. С. 201—266.
- Климонтович Ю. Л. Энтропия и информация открытых систем. *Успехи физ. наук*. 1999. Т. 169. № 4. С. 443—453.
- Князева Е. Н., Курдюмов С. П. Синергическое расширение антропоного принципа. В кн.: *Синергическая парадигма*. Москва: Прогресс, 2000. С. 80—106.
- Колесниченко А. В. Синергический подход к описанию стационарно-неравновесной турбулентности астрогеофизических систем. Институт прикладной математики РАН. Препр. Москва, 2003. 70 с.
- Копытов В. В., Костенко К. С. Исследование эффекта перемежаемости в системах связанных нелинейных осцилляторов. *Электрон. журн. "Журнал радиоэлектроники"*. 2003. № 3. <http://jre.cplire.ru/mac/mar03/index.html>.
- Косообоков В. Г. Теоретическая база и алгоритмы прогноза землетрясений на основе предвестников активизации сейсмичности: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2004. 32 с.
- Ланда П. С., Трубецков Д. И., Гусев В. А. Заблуждения и реальность в некоторых задачах физики (теория и эксперимент). *Успехи физ. наук*. 2009. Т. 179. № 3. С. 255—277.
- Лоскутов А. Ю. Очарование хаоса. *Успехи физ. наук*. 2010. Т. 180. № 12. С. 1305—1329.
- Любушин А. А. Прогноз Великого Японского Землетрясения и сингулярности сейсмического шума. Москва: ИФЗ РАН, 2013. http://www.seismicweather.com/downloads/russian_nature_Journal.pdf.
- Любушин А. А. Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 г.: долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсам. *Геофиз. процессы и биосфера*. 2011. Т. 10. № 1. С. 9—35.
- Макаров П. В. Самоорганизованная критичность деформируемых твердых тел и сред и перспективы прогноза разрушения: Материалы Междунар. конф. "Современные проблемы прикладной математики механики: теория, эксперимент и практика", посвященной 90-летию со дня рождения акад. Н. Н. Яненко, Новосибирск, Россия, 30 мая — 4 июня 2011 г.
- Малинецкий Г. Г. Хаос: тупики, парадоксы, надежды. *Компьютерра*. 1998. № 47. <http://old.computerra.ru/1998/275/2064/>.
- Малинецкий Г. Г., Курдюмов С. П. Нелинейная динамика и проблемы прогноза. *Вестник РАН*. 2001. Т. 71. № 3. С. 210—224.
- Москаленко О. И., Короновский А. А., Шурыгина С. А. Поведение нелинейных систем на границе синхронизации, индуцированной шумом. *Нелинейная динамика*. 2011. Т. 7. № 2. С. 197—208.
- Некоркин В. И., Безручко Б. П., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., Смирнов Д. А., Тасс П. А. Моделирование и диагностика взаимодействия нелинейных колебательных систем по хаотическим временным рядам (приложения в нейро-

- физиологии). *Успехи физ. наук.* 2008. Т. 178. № 3. С. 323—329.
- Николаев А. В. Развитие методов нелинейной геофизики. *Электрон. науч.-информац. журн. "Вестник ОГГГГ РАН"*. 2002. № 1(20). 5 с.
- Павлов А. Н., Анищенко В. С. Мультифрактальный анализ сложных сигналов. *Успехи физ. наук.* 2007. Т. 177. № 8. С. 859—870.
- Панин В. Е., Егорушкин В. Е., Панин А. В. Нелинейные волновые процессы в деформируемом твердом теле как многоуровневой иерархически организованной системе. *Успехи физ. наук.* 2012. Т. 182. № 12. С. 1351—1357.
- Пантелеев Н. А., Плехов О. А., Наймарк О. Б. Модель геосреды с дефектами: коллективные эффекты развития несплошностей при формировании потенциальных очагов землетрясений. *Геодинамика и тектонофизика.* 2013. Т. 4. Вып. 1. С. 37—51.
- Руманов Э. Н. Критические явления вдали от равновесия. *Успехи физ. наук.* 2013. Т. 183. № 1. С. 103—112.
- Саговский М. А. Геофизика и физика взрыва. Избранные труды. Москва: Наука, 2004. 440 с.
- Сигорин А. Я. Выдающееся достижение Российской академии наук: успешный прогноз землетрясения в Японии 11 марта 2011 г. *Геофиз. процессы и биосфера.* 2011. Т. 10. № 1. С. 5—8.
- Страхов В. Н. К новой парадигме сейсмологии. *Природа.* 1989. № 12. С. 4—6.
- Страхов В. Н., Савин М. Г. Об управлении сейсмической активностью. *Геофиз. журн.* 2013 а. Т. 35. № 6. С. 3—10.
- Страхов В. Н., Савин М. Г. О научных основах краткосрочного прогноза землетрясений. *Геофиз. журн.* 2013 б. Т. 35. № 2. С. 18—24.
- Страхов В. Н., Савин М. Г. Уменьшение сейсмической опасности: упущенные возможности. *Геофиз. журн.* 2013 в. Т. 35. № 1. С. 4—12.
- Трофименко С. В. Структура и динамика геофизических полей и сейсмических процессов в блоковой модели земной коры: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Томск, 2011. 36 с.
- Фригман А. М., Поляченко Е. В., Насырканов Н. Р. О некоторых корреляциях в сейсмодинамике и двух компонентах сейсмической активности Земли. *Успехи физ. наук.* 2010. Т. 180. № 3. С. 303—312.
- Хорган Дж. Конец науки: взгляд на ограниченность знания на закате Века Науки. Перевод с англ. Санкт-Петербург: Амфора, 2001. 479 с.
- Чернавский Д. С., Старков Н. И., Малков С. Ю., Косе Ю. В., Щербаков Ф. В. Об эконофизике и ее месте в современной теоретической экономике. *Успехи физ. наук.* 2011. Т. 181. № 7. С. 768—778.
- Шаповал А. Б. Вопросы прогнозируемости в изотропных моделях с самоорганизованной критичностью: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2011. 35 с.
- Шерман С. И. Тектонофизический анализ сейсмического процесса в зонах активных разломов литосферы и проблема среднесрочного прогноза землетрясений. *Геофиз. журн.* 2005. Т. 27. № 1. С. 20—38.
- Шуман В. Н. Геосреда и сейсмический процесс: проблемы управления. *Геофиз. журн.* 2011 а. Т. 33. № 2. С. 16—27.
- Шуман В. Н. Геосреда как открытая нелинейная диссипативная динамическая система — задачи идентификации, возможности управления, прогноз эволюции (обзор). *Геофиз. журн.* 2011 б. Т. 33. № 5. С. 35—50.
- Шуман В. Н. О проблеме фоновой электромагнитно-акустической регуляции сейсмичности: геоинженерный аспект. *Геофиз. журн.* 2013 а. Т. 35. № 1. С. 46—60.
- Шуман В. Н. Обобщенное уравнение генерации спонтанной электромагнитной эмиссии во фрактальной среде. *Геофиз. журн.* 2013 б. Т. 35. № 3. С. 46—53.
- Шуман В. Н. О феноменологических моделях и прогнозе сейсмичности: оправдан ли пессимизм, обоснованы ли надежды. *Геофиз. журн.* 2013 в. Т. 35. № 2. С. 24—37.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K., 1987. Self-Organized Criticality: An Explanation of 1/f Noise. *Phys. Rev. Lett.* 59, 381—384.
- Earthquake Prediction: The Scientific Challenge Collected papers, 1996. Washington: National Academy Press. DC. 2000 55. <http://www.ras.org.uk/ras>.
- Kagan Y. Y., 1994. Observational evidence for earthquakes as a nonlinear dynamic process. *Physica D.* 77, 160—172.
- Keilis-Borok V. I., 1994. Symptoms of instability in a system of earthquake-prone faults. *Physica D.* 77, 193—199.
- Perke S. L., Carlson M. M., 1994. Predictability of self-organizing systems. *Phys. Rev. E* 50, 236—242.

On forecast and predictability of seismic process

© V. N. Shuman, 2014

Special features of evolution of geo-medium, which has a quality of self-organized criticality, problems of physics of destruction in the earth's crust, predictability and forecast of seismic process dynamics are being discussed based on the ideas and methods of nonlinear dynamics. It is mentioned that the key problems of multileveled self organization and taking into account nonlinearity of hierarchically organized geo-systems are still weakly elaborated and need concretization. Attention is accentuated on some aspects of formation of focal zones of destruction in the earth's crust, the stage of pre-destruction and super-fast catastrophic stage of evolution. Regimes of excitation of autostructures in geo-medium, problems of repeatability of large-scale ruptures are considered. An attempt of interpretation of strong seismic event as an autostructure (autosoliton) of great amplitude or localized dissipative structure of sharpening, which are formed in geomedium in case of strict regime of its excitation as a part of the single seismic process. A set of problems is considered related to principal predictability of the process, quality of intermittence, synchronization, phenomenon of stochastic resonance, problems of dynamic description of nonlinear systems with chaotic behavior according to the data of monitoring observations. It is mentioned that the presence of a regime of sharpening of the process (pre-destruction phase) can be considered as a physical-mechanical basis of existence, manifestation and search of foreshock phenomena. From this viewpoint the problem of strong earthquakes forecast does not look like hopeless and gives reason for optimism.

Key words: seismicity, spontaneous fluctuations, dynamics, dynamical systems, auto synchronization of oscillations.

References

- Anishhenko V. S., Astahov S. V., 2013. Theory returns Poincare and its application to problems of nonlinear physics. *Uspehi fizicheskikh nauk* 183 (10), 1009—1028 (in Russian).
- Anishhenko V. S., Nejman A. B., Moss F., Shimanovskij-Gajer L., 1999. Stochastic resonance enhanced order. *Uspehi fizicheskikh nauk* 169 (1), 7—38 (in Russian).
- Vasil'ev A. N., Romanovskij Ju. M., Jahno V. G., 1979. Wave processes in distributed kinetic systems. *Uspehi fizicheskikh nauk* 128 (4), 625—666 (in Russian).
- Vikulin A. V., 2003. Physics wave seismic process. Petropavlovsk-Kamchatsky, 150 p. (in Russian).
- Vol A., Gilat A., 2006. Primary hydrogen and helium as energy sources earthquakes. In: *Genesis of hydrocarbon fluids and deposits* (Eds A. Dmitrievskij, B. Valyaev). Moscow: GEOS, 160—166 (in Russian).
- Genshaft Ju. S., 2009. Earth — an open system: geological and geophysical investigation. *Fizika Zemli*, (8), 4—12 (in Russian).
- Gijon Je., Mitesku K. D., Julen Zh.-P., Ru S., 1991. Fractals and percolation in porous media. *Uspehi fizicheskikh nauk* 161 (10), 121—128 (in Russian).
- Gufeld I. L., 2013 a. Is it possible to forecast strong crustal earthquakes. *Vestnik RAN* 83 (3), 236—245 (in Russian).
- Gufeld I. L., 2013 б. On the degassing at depths and structure of lithosphere and upper mantle. *Jelektronnyj zhurnal "Glubinnaja neft"* 1 (2), 172—188.
- Gufeld I. L., 2007. The seismic process. Physical and chemical aspects. Publisher name. Korolev, 160 p. (in Russian).
- Gufeld I. L., Matveeva O. N., Novoselov O. N., 2011. Why we cannot predict strong earthquakes in the Earth's crust. *Geodinamika i tektonofizika* 2 (4), 378—415 (in Russian).
- Dobrovolsky I. P., 2009. The Mathematical Theory of Preparation and Prediction of Tectonic Earthquakes. Moscow: Fizmatlit, 240 p. (in Russian).
- Dremin I. M., Ivanov O. V., Nechitalo V. A., 2001. Wavelets and their applications. *Uspehi fizicheskikh nauk* 171 (5), 465—501 (in Russian).
- Dubovikov M. M., Starchenko N. V., 2011. Ekonophysics and the fractal analysis of financial time series. *Uspehi fizicheskikh nauk* 181 (7), 779—786 (in Russian).

- Il'inskij Ju. A., Keldysh L. V.*, 1989. The interaction of electromagnetic radiation with matter. Moscow: MSU Publ., 304 p. (in Russian).
- Kadomtsev B. B.*, 1994. Dynamics and Information. *Uspehi fizicheskikh nauk* 164 (5), 449—530 (in Russian).
- Kerner B. S., Osipov V. V.*, 1989. Autosolitons. *Sov. Uspehi fizicheskikh nauk* 157 (2), 201—266 (in Russian).
- Klimontowich Yu. L.*, 1999. Entropy and information of open systems. *Uspehi fizicheskikh nauk* 169 (4), 443—453 (in Russian).
- Knjazeva E. N., Kurdjumov S. P.*, 2000. Synergistic expansion of the anthropic principle. In: *Synergetic Paradigm*. Moscow: Progress, 80—106 (in Russian).
- Kolesnichenko A. V.*, 2003. Synergetic approach to the description of nonequilibrium stationary turbulence astrophysical systems. Working paper. Moscow: Inst. Appl. Math. RAS, 70 p. (in Russian).
- Kopytov V. V., Kostenko K. S.*, 2003. Investigating the effect of intermittency in systems of coupled nonlinear oscillators. *Jelektronnyj zhurnal "Zhurnal radioelektroniki"* (3) (in Russian).
- Kosobokov V. G.*, 2004. The theoretical basis and earthquake prediction algorithms based precursors activate seismicity: Dr. phys. and math. sci. diss. Moscow, 32 p. (in Russian).
- Landa P. S., Trubetskhov D. I., Gusev V. A.*, 2009. Delusions versus reality in some physics problems: theory and experiment. *Uspehi fizicheskikh nauk* 179 (3), 255—277 (in Russian).
- Loskytov A. Yu.*, 2010. Fascination of chaos. *Uspehi fizicheskikh nauk* 180 (12), 1305—1329 (in Russian).
- Ljubushin A. A.*, 2013. Forecast Great Japan Earthquake and singularity of seismic noise. Moscow: IPE RAS Publ. http://www.seismicweather.com/downloads/russian_nature_Journal.pdf.
- Ljubushin A. A.*, 2011. Earthquake disaster in Japan on March 11 2011: Long-term prognosis of low-frequency microseisms. *Geofizicheskie processy i biosfera* 10 (1), 9—35 (in Russian).
- Makarov P. V.*, 2011. Self-organized criticality of deformable solids and media destruction and prospects forecast: *Proceedings of the Intern. Conf. "Modern Problems of Applied Mathematics Mechanics: Theory, Experiment and Applications"*, dedicated to the 90th anniversary of academician N. N. Janenko, Novosibirsk, Russia, 30 May—4 June 2011 (in Russian).
- Malineckij G. G.*, 1998. Chaos: puffs, paradoxes of hope. *Komp'juterra* (47) (in Russian). <http://old.computerra.ru/1998/275/2064>.
- Malineckij G. G., Kurdjumov S. P.*, 2001. Nonlinear Dynamics and Prediction Problems. *Vestnik RAN* 71 (3), 210—224 (in Russian).
- Moskalenko O. I., Koronovskij A. A., Shurygina S. A.*, 2011. Behavior of nonlinear systems on the border of synchronization induced by noise. *Nelinejnaja dinamika* 7 (2), 197—208 (in Russian).
- Nekorkin V. I., Bezruchko B. P., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D., Smirnov D. A., Tass P. A.*, 2008. Methods of wave-based physics in neuroscience problems and applications. *Uspehi fizicheskikh nauk* 178 (3), 323—329 (in Russian).
- Nikolaev A. V.*, 2002. Development of nonlinear geophysics. *Vestnik OGGGGG RAN* 1, 5 p. (in Russian).
- Pavlov A. N., Anishenko V. S.*, 2007. Multifractal analysis of complex signals. *Uspehi fizicheskikh nauk* 177 (8), 859—870 (in Russian).
- Panin V. E., Egorushkin V. E., Panin A. V.*, 2012. Nonlinear wave processes in a deformable solids multiscale hierarchically organized system. *Uspehi fizicheskikh nauk* 182 (12), 1351—1357 (in Russian).
- Panteleev I. A., Plekhov O. A., Naimark O. B.*, 2013. Model of geomedia containing defects: collective effects of defects evolution during formation of potential earthquake foci. *Geodinamika i tektonofizika* 4 (1), 37—51 (in Russian).
- Rumanov E. N.*, 2013. Critical phenomena far from equilibrium. *Uspehi fizicheskikh nauk* 182 (12), 1351—1357 (in Russian).
- Sadovskij M. A.*, 2004. Geophysics and Physics of explosion. Selected Works. Moscow: Nauka, 440 p. (in Russian).
- Sidorin A. Ja.*, 2011. Outstanding achievement of the Russian Academy of Sciences: successful prediction of the earthquake in Japan March 11, 2011. *Geofizicheskie processy i biosfera* 10 (1), 5—8 (in Russian).
- Strakhov V. N.*, 1989. Towards a new paradigm of seismology. *Priroda* (12), 4—6 (in Russian).
- Strakhov V. N., Savin M. G.*, 2013 a. On the control of seismic activity. *Geofizicheskij zhurnal* 35 (6), 3—10 (in Russian).
- Strakhov V. N., Savin M. G.*, 2013 б. On scientific principles of short-term earthquake prediction. *Geofizicheskij zhurnal* 35 (2), 18—24 (in Russian).

- Strakhov V.N., Savin M.G.*, 2013 в. Seismic hazard reduction: lost opportunities. *Geofizicheskij zhurnal* 35 (1), 4—11 (in Russian).
- Trofimenko S.V.*, 2011. Structure and dynamics of geophysical fields and seismic processes in crustal block model: Dr. geol. and min. sci. dis. Tomsk, 36 p. (in Russian).
- Fridman A.M., Polyachenko E.V., Nasyrkanov N.R.*, 2010. On some correlations in seismodynamics and on two components of Earth's seismic activity. *Uspehi fizicheskikh nauk* 180 (3), 303—312 (in Russian).
- Horgan J.*, 2001. The End of Science: Facing the Limits of Knowledge is the Twilight of Science Age. Sankt-Peterburg: Amfora, 479 p. (in Russian).
- Chernavkii D.C., Starkov N.I.; Malkov S.Yu., Kose Yu.V., Shcherbakov A.V.*, 2011. On econophysics and its place in modern theoretical economics. *Uspehi fizicheskikh nauk* 181 (7), 768—778 (in Russian).
- Shapoval A.B.*, 2011. Questions predictability in isotropic models with self-organized criticality: Dr. phys. and mathem. sci. dis. Moscow, 35 p. (in Russian).
- Sherman S.I.*, 2005. Tectonophysical analysis of seismic process in zones of active faults of the lithosphere and the problem of medium-term earthquake prediction. *Geofizicheskij zhurnal* 27 (1), 20—38 (in Russian).
- Shuman V.N.*, 2011 а. Geomedium and seismic process: problems of management. *Geofizicheskij zhurnal* 33 (2), 16—27 (in Russian).
- Shuman V.N.*, 2011 б. Geomedium as an open nonlinear dissipative dynamic system — the problem of identification, possibly of control, forecast of evolution (Review). *Geofizicheskij zhurnal* 33 (5), 35—50 (in Russian).
- Shuman V.N.*, 2013 а. On the problem of the background electromagnetic-acoustic redulation of seismic activity: geo-engineering aspect. *Geofizicheskij zhurnal* 35 (1), 46—60 (in Russian).
- Shuman V.N.*, 2013 б. Generalized equation for generation of the spontaneous electromagnetic emission in the fractal medium. *Geofizicheskij zhurnal* 35 (3), 46—53 (in Russian).
- Shuman V.N.*, 2013 в. On phenomenological models and seismic activity prediction: whether pessimism is legitimate or hopes are substantiated. *Geofizicheskij zhurnal* 35 (2), 24—37 (in Russian).
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K.*, 1987. Self-Organized Criticality: An Explanation of 1/f Noise. *Phys. Rev. Lett.* 59, 381—384.
- Earthquake Prediction: The Scientific Challenge* Collected papers, 1996. Washington: National Academy Press. DC. 2000 55. <http://www.ras.org.uk/ras>.
- Kagan Y.Y.*, 1994. Observational evidence for earthquakes as a nonlinear dynamic process. *Physica D.* 77, 160—172.
- Keilis-Borok V.I.*, 1994. Symptoms of instability in a system of earthquake-prone faults. *Physica D.* 77, 193—199.
- Perke S.L., Carlson M.M.*, 1994. Predictability of self-organizing systems. *Phys. Rev. E* 50, 236—242.
- Zosimov V.V., Ljamshev L.M.*, 1995. Fractals in wave processes. *Uspehi fizicheskikh nauk* 165(4), 362—402 (in Russian).