

Сейсмоэлектромагнетизм и пространственно-временные структуры

© *В. Н. Шуман, 2015*

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина
Поступила 19 сентября 2015 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

Обговорено нові ідеї, підходи та методи сучасної сейсмології, насамперед стосовно високоорганізованих просторово-часових структур у дисипативних середовищах, далеких від термодинамічної рівноваги, зокрема автоструктур. Розглянуто деякі деталі уже проведених досліджень і їх наслідки, на які звичайно не звертали достатньої уваги, але які можуть бути вирішальними для майбутніх робіт. При цьому замість поширеного розуміння сейсмічності як фундаментального наслідку еволюції геосистем до стану самоорганізованої критичності, обмеженого рамками систем з аномально повільною динамікою, запропоновано його інтерпретацію як метастабільних станів геосередовища та їх послідовності. Суть нового підходу — парадигма переходів просторових образів у неоднорідному багатомасштабному ієрархічно організованому активному геосередовищі, які відображуються в просторовій структурі спонтанних емісій літосферного походження — сейсмічній та електромагнітній. Передусім маються на увазі задачі теорії переходів просторових образів замість відомих задач теорії біфуркацій динамічних систем. Підкреслено роль і вплив на динамічні процеси в геосередовищі завад різної інтенсивності та кольорності, які сприяють появі режимів його функціонування, які не можуть бути реалізованими в разі їх відсутності. Дискутуються можливі та видимі варіанти застосування запропонованого підходу.

Ключові слова: сейсмічність, сейсмічний процес, самоорганізована критичність, автохвильові процеси, автоструктури, спонтанні емісії, прогнозованість геосистем.

Введение. Как известно, вопросы прогнозируемости поведения геосистем и, в частности, прогнозы конкретных сейсмических событий имеют сравнительно давнюю историю, обширную библиографию и остаются весьма актуальными до настоящего времени [Гуфельд, Новоселов, 2014; Гульельми, 2015; Шуман, 2015]. Весьма вероятно, что основные проблемы, связанные с их решением, состоят, прежде всего, в сложности исследуемых геосистем и многофакторности действия на них физических полей различной природы. В то же время полученные в последние годы результаты определенно дают основания для физической трактовки литосферы Земли как пространственно структурированной существенно многомасштабной системы с нелинейной динамикой. Установлено, что геометрические структуры многомасштабных неоднородностей литосферы определяет не только пространственные свойства сейсмичности, но и ее энергетические и временные свойства. Эта система демонстрирует также ряд важных свойств сейсмического процесса, таких как

сейсмический цикл, форшоковая и афтершоковая активность, степенной характер убывания сейсмических событий после сильнейших событий (закон Омори для афтершоков) [Гульельми, 2015]. При этом сильным землетрясениям, как правило, предшествуют либо аномальное поведение сейсмической активности, либо ее аномальное понижение, либо их колебания в различных пространственно-временных зонах [Шаповал, Шнирман, 2011; Короновский, Наймарк, 2012]. Однако детали сейсмического процесса с достаточной полнотой не изучены, не существуют и его общепризнанные физико-механические модели. В столь сложной ситуации получили широкое распространение методы изучения геосистем, основанные на анализе сигналов, генерируемых системой (временных рядов, в частности, каталогов землетрясений) без априорной информации о системе без построения специфической модели, описывающей динамику исследуемого ряда. По-видимому, задача прогноза в таком контексте относится к одной из старейших задач временных рядов [Лоскутов, 2010].

В такой постановке задачи был предложен и разработан ряд методик и алгоритмов прогноза, однако применительно к прогнозу сейсмичности они оказались малоэффективными. И дело здесь не в длине обрабатываемых рядов, которая, разумеется, должна быть достаточно большой. С развитием нелинейной динамики оказалось, что задача прогноза более сложная, выходящая за эти рамки. Весьма вероятно, что именно здесь, в этом контексте, мы нуждаемся в новых идеях описания и трактовки сейсмичности, и как раз здесь все еще отмечается относительно медленный прогресс.

Необходимость описания подобных систем и прогноза их эволюции привела к появлению множества работ, в которых были заложены основы теории самоорганизации. При этом использовались различные подходы и терминология: теория диссипативных структур или теория самоорганизации, синергетика, теория открытых систем и др. В дальнейшем под термином самоорганизация будем считать установление в диссипативной неравновесной открытой системе (геосреде) пространственных структур, эволюционирующих во времени, параметры которых определяются свойствами этой среды и слабо зависят от пространственной структуры источника неравновесности (потоков энергии и вещества), начального состояния и условий на границах.

Согласно современной трактовке, теория самоорганизации включает термодинамику неравновесных (открытых) систем, синергетику, теорию катастроф. В свою очередь, в основу современной синергетики положены три парадигмы: диссипативных структур, динамического хаоса, сложности. Теория катастроф изучает особенности гладких отображений и бифуркаций динамических систем. При этом именно потоки энергии и вещество, пронизывающее систему, ведут к возникновению в ней эффектов самоорганизации — образования макроскопических диссипативных структур, причем это структурообразование характеризуется в широком диапазоне масштабов и параметров пространственно-временным скейлингом. Этот пространственно-временной скейлинг обычно характеризуется сильными, спадающими по степенному закону корреляциями, которые являются типичными для критических явлений [Зеленый, Милованов, 2004]. Как известно, исследования явлений подобного рода объединяются общим названием «самоорганизованная критичность», позиционирующая скейлинговый контекст

самоорганизации [Aschwanden et al., 2014].

Как известно, концепция самоорганизованной критичности (свойства сложных нелинейных динамических систем в ходе своей эволюции приходят в критическое состояние) — одно из относительно новых направлений в теории таких систем. Ее суть состоит в том, что по мере развития нелинейной системы она неизбежно приближается к точке бифуркации, ее устойчивость резко снижается и в ней спонтанно создаются условия, при которых малые возмущения могут спровоцировать крупные события (катастрофу). Возникает естественная задача прогноза динамики геосистем в критическом состоянии. При этом предпочтение, отдаваемое критическим режимам функционирования систем, обусловлено их относительной термодинамической выгодностью. Однако, несмотря на заметный прогресс в изучении самоорганизованной критичности (СОК), многие актуальные проблемы, ассоциируемые с ней, до настоящего времени остаются нерешенными. Неудивительно, что в современной геофизической литературе отношение к ее применению весьма неоднозначно [Шаповал, 2011; Захаров, 2014].

По существу, все еще остается открытым вопрос: возможен ли в системах с СОК эффективный прогноз? Может оказаться, что в зависимости от конкретной ситуации использование СОК при прогнозе сейсмичности будет как успешным, так и бесполезным. И это не удивительно, так как интерпретация сейсмического процесса в качестве фундаментального следствия эволюции геосистемы к состоянию СОК оказывается ограниченной рамками систем с некоторой характерной (аномально медленной) динамикой. К тому же в данный момент отсутствует эффективный критерий обнаружения (особенно экспериментального) СОК в системе. В итоге оптимистические ожидания здесь пока явно опережают реальный прогресс в этой области исследований.

Несомненно, исследование этих и близких явлений требует выработки новых моделей, методов и, что не менее важно, адекватных образов и понятий, общих для неравновесных сред произвольной природы. В частности, нелинейная динамика способствовала пониманию и трактовке сейсмического процесса как результата устойчивой переходной активности геосреды. С точки зрения геофизики сейсмичность — неравномерный во времени переходный процесс, нестационарная активность геосреды. Это — метастабильные со-

стояния геосреды и последовательность таких метастабильных состояний, время существования которых достаточно велико. При этом основная идея будет состоять в том, чтобы описать сейсмический процесс в рамках его пространственно-временной трактовки в терминах автоколебаний. С этой точки зрения принятое сейчас понимание сейсмического процесса как фундаментального следствия эволюции сейсмотектонической системы к состоянию самоорганизованной критичности, очевидно, не вполне корректно и носит частный характер.

Автоколебания — это незатухающие колебания в нелинейной диссипативной системе, поддерживаемые внешними источниками энергии. Их вид и свойства определяются самой системой. Это, к примеру, могут быть процессы бифуркаций и синхронизации колебаний отдельных подсистем, их ансамблей, а также образование очагов хаоса и порядка в распределенных системах. При этом представляют интерес неоднородные ансамбли автоструктур, когда неоднородность неравновесной среды связана с наличием границ либо с действием внешних полей.

Итак, если сейсмичность может более адекватно интерпретироваться в качестве и терминах реализации некоторого нелинейного автоволнового процесса, на передний план выходят задачи теории переходов пространственных образов автоструктур. Однако исследование динамики пространственных ансамблей структур, проблемы, связанные с бифуркациями в пространственных ансамблях, много сложнее обычных задач теории бифуркаций динамических систем. Более того, по мнению [Гапонов-Грехов, Рабинович, 1987а,б] такая постановка задачи выглядит почти безнадежной: метастабильным образом в фазовом пространстве динамической модели отвечают уже не аттракторы, а переходные множества траекторий, внутри которых изображающая точка проводит основное время.

Важным является изучение синхронизации автоколебаний и влияния шумов на синхронизацию. Можно предположить, что сейсмическое событие обусловлено образованием автоструктуры большой амплитуды, формируемой в геосистеме за счет внешнего, возможно, нестационарного внешнего воздействия (энергомассопотока), превышающего некоторый пороговый уровень, а слабый хаос — реализация мягкого режима возбуждения автоструктур. Возникают важные вопросы, в

частности, что такое пространственный хаос и какую роль в его формировании играют пространственные структуры, как соотносятся и взаимодействуют между собой пространственный и временной хаос и как он, в свою очередь, может быть связан с эволюцией геосистем и взаимодействием их подсистем [Гапонов-Грехов, Рабинович, 1987а, б]. Однако аналитические возможности исследования автоструктур и динамики их ансамблей ограничены решением некоторых приближенных или модельных уравнений, а численный эксперимент весьма затруднен. Необходимость экспериментальных исследований при таком подходе весьма актуальна. Становится очевидной неадекватность существующих методов исследования эволюции геосистем и методов их мониторинга. С этой точки зрения, возможно, исследование динамики пространственных ансамблей автоструктур в реальной геосреде может оказаться и неизбежным, и необходимым. Следует также упомянуть, что самоорганизация не является универсальным свойством геосистем, реализуется лишь в определенных особых условиях. В то же время наличие пространственно-временной структуры является ее всеобщим и фундаментальным свойством [Эбелинг, 1979]. С этой точки зрения идея описания сейсмического процесса в рамках пространственно-временного подхода или трактовки в терминах автоколебаний динамики пространственных ансамблей структур (автоструктур) не лишена оснований.

Возможно, такая постановка вопроса может показаться перефразировкой старых классических подходов к изучению сейсмичности. Но она не вполне корректна. Автоструктуры и бифуркации их статических образов в зависимости от параметров энергомассопотоков и уровня шумов в геосистеме, которые находят отражение в пространственно-временной структуре и динамике спонтанных эмиссий, генерируемых системой, — гораздо менее тривиальные объекты исследований, чем это считалось ранее, что создает немало трудностей при отборе материала для изложения. Такой отбор диктовался актуальностью вопросов, научными интересами автора и возможностью узнавать то, что, очевидно, многие знали уже раньше. Он позволял уклониться или обойти стороной многие конкретные вопросы прогноза сейсмичности и ограничиться значительно более скромными задачами, при этом отнюдь не минимизируя намеки на те тупики, с которыми обычно сталкивались при упоминании об

ошибочных идеях, с которыми имели дело. Но в любом случае при решении ключевых вопросов прогноза и прогнозируемости геосистем сложно уклониться от рассмотрения дискуссионных вопросов в теории СОК, в частности ее универсальности, теоретических основ, новых тенденций развития и открытых проблем.

Самоорганизованная критичность и сейсмический процесс. Важный объект геофизических исследований — процессы в сильнонеравновесных открытых геосистемах. Имеются веские основания предполагать, что в основу большинства проявлений геопроцессов могут быть положены общие свойства открытых нелинейных диссипативных систем. Потоки энергии и вещества, пронизывающие эти системы, обуславливают возникновение в них эффектов самоорганизации образования макроскопических диссипативных структур. В сферу интересов геофизики попадает все большее число нелинейных энергонасыщенных сред, структурообразование в которых демонстрирует в широком диапазоне параметров и масштабов пространственно-временной скейлинг, характеризующийся сильными, спадающими по степенному закону корреляциями, типичными для критических явлений. Можно предполагать, что физические причины такого характера эволюции связаны с взаимодействием между различными степенями свободы геосистем, которые ведут к нелокальным корреляциям и коллективному поведению. При этом критический режим в процессах самоорганизации оказывается самонастраивающимся и самосогласованным. Относительно недавно исследования явлений такого рода были объединены в рамках термина самоорганизованной критичности.

Одна из важнейших особенностей коллективных явлений — свойство универсальности, т.е. проявлений аналогий и реализация общих принципов динамики, а одно из основных достижений нелинейной динамики XX века — обнаружение универсальных сценариев переходов от упорядоченного движения к хаотическому при изменении параметров системы. При этом скейлинговый аспект самоорганизации и автомодельность — важнейшая особенность эволюции нелинейных систем в случае сильной коррелируемости поведения их подсистем. Однако, несмотря на впечатляющее разнообразие физических контекстов, в которых проявляется нелинейная динамика конкретных систем, все еще остается открытым вопрос, насколько эта общая теория и фунда-

ментальные законы самоподобной динамики соответствуют и в какой степени могут быть адаптированы к сейсмической реальности.

Как известно, при исследованиях сейсмичности установлены различные законы подобия, реализующиеся в широком диапазоне масштабов. К ним могут быть отнесены закон Гуттенберга—Рихтера о скейлинговой зависимости частоты повторяемости от энергетического класса сейсмического события, закон Кнопова—Кагана для распределения временных интервалов между событиями, закон Омори для распределения количества афтершоков сильных событий во времени и др. Возможно, по этой причине в геофизической литературе в настоящее время доминирует понимание сейсмического процесса в качестве фундаментального следствия эволюции сейсмоактивной системы к состоянию СОК, а сами эти системы принадлежат к классу систем с СОК [Шаповал, 2011; Захаров, 2014; Гульельми, 2015]. При этом динамика сейсмотектонических систем на разных пространственно-временных масштабах обуславливает согласованное самоподобие сейсмического процесса и современных тектонических движений [Захаров, 2014]. В то же время ситуация относительно возможности и реализуемости самого прогноза остается весьма неоднозначной [Шаповал, 2011; Наймарк, Захаров, 2012; Захаров, 2014; Гуфельд, 2013; Гуфельд, Новоселов, 2014].

В геофизической литературе к настоящему времени сложилось весьма неоднозначное отношение к проблеме применимости или приложений СОК к этой проблеме. Отмечаются попытки поисков здесь неких аналогов «здравого смысла». Но в чем он состоит и где этот «смысл»? Полагая, что процесс подготовки землетрясений порождается типичной системой с СОК и, в частности, соответствует закону Гуттенберга—Рихтера, высказываются мнения как о невозможности прогноза сейсмических событий [Geller, 1997], так и его принципиальной реализуемости в системах с СОК в реальном времени [Шаповал, 2011]. Ясно, что здесь нужны новые идеи и подходы. Ввиду нетривиальности проблемы, остановимся на некоторых ее фрагментах несколько подробнее.

О концепции самоорганизованной критичности. Термин «самоорганизованная критичность» введен П. Баком с сотрудниками в 1987 г. [Bak et al., 1987] для объяснения универсального характера возникновения $1/f$ -шума (фликкер-шума) в сложных нелинейных динамических системах. Смысл СОК — эволюция

таких систем к критическому состоянию без настройки каких-либо параметров. Позднее смысл термина критичность был расширен к более общему значению — критической точке [Aschwanden et al., 2014]. Суть СОК состоит в том, что по мере эволюции нелинейной динамической системы она неизбежно приближается к критической точке (точке бифуркации). Иначе говоря, такие системы могут естественным образом эволюционировать к определенному критическому состоянию, в котором они теряют характерные пространственные и временные масштабы, их корреляционный радиус неограниченно возрастает, а корреляционные функции имеют степенные асимптотики. Существенно, что это критическое состояние практически не зависит от начальных условий и не требуется настройки параметров системы, чтобы достичь его.

Как известно, явление с СОК обычно связывают со степенным характером графика повторяемости, отражающего зависимость числа событий от их линейного масштаба. Индикатор СОК — степенные законы распределения различных временных и пространственных характеристик сейсмичности. Фрактальная структура и фликкер-шум со спектром мощности $1/f$ — пространственные и временные отпечатки СОК.

В более общей формулировке СОК — это устойчивое состояние сложной пространственно-распределенной нелинейной динамической системы, состоящей из множества подсистем, локально взаимодействующих между собой, испытывающей внешнее, вообще говоря, возможно достаточно слабое воздействие, влияющее на некоторую относительно малую часть рассматриваемой системы. Специфика этого состояния — стохастическое возникновение локальных переходных процессов (неустойчивостей), поддерживающих общую (глобальную) устойчивость этой системы.

Отметим двойственную природу самоорганизованной критичности систем [Aschwanden et al., 2014]. Это СОК-теория или СОК-модель? Двойственная природа СОК-систем понимается в том смысле, что они включают как универсальные статистические аспекты, применимые для всех СОК-систем, так и специальные физические механизмы, являющиеся универсальными для отдельных (частных) СОК-явлений. По этой причине в приложениях используется более прагматичное и физически более обоснованное определение СОК-систем: СОК есть критическое состояние нелинейной

энергонасыщенной диссипативной системы, которая медленно и непрерывно движется по направлению к критическому значению порога неустойчивости, продуцируя немасштабную, фрактально-диффузионную и перемежающуюся лавинами динамику [Aschwanden et al., 2014].

Кроме того, многие полагают, что СОК — первая общая теория сложных систем. При этом в своем большинстве модели СОК имеют дело с абстрактными сущностями и их построение и исследование может трактоваться скорее как создание языка, нежели как описание реальных систем [Бак, 2014].

Как неотъемлемое проявление СОК трактуется фрактальная динамика активных систем [Иудин, 2005]. При этом отмечается широкое разнообразие физических контекстов, в которых реализуется фрактальная динамика конкретных систем. Фрактальная динамика — это способ моделирования нелинейных систем, обладающих свойством самоподобия. При этом пространственно временной скейлинг характеризуется сильными, спадающими по степенному закону корреляциями, являющимися типичными для критических явлений, а сам критический режим в процессах самоорганизации оказывается самосогласованным и самонастраивающимся.

СОК и фликкер-шум. Как уже упоминалось, одной из основных целей авторов СОК являлось объяснение причины возникновения флуктуаций со спектром типа $1/f^\beta$ в сложных неравновесных средах, состоящих из многочисленных взаимодействующих подсистем, также нелинейных. Переход системы к СОК обычно сопровождается появлением так называемого «розового» шума с показателем β , близким к единице на низких частотах. При этом концепция СОК представляет «розовый» шум следствием достижения сложной системой критического состояния, к которому эта система склонна приходить, а сама генерация «розового» шума оказывается реализуемой только при согласовании количества элементов в системе с длительностью ее эволюции. П. Бак по этому поводу отмечает: «... мы пришли к выводу, что шум $1/f$ должен быть кооперативным феноменом, когда различные элементы большой системы действуют вместе каким-то согласованным образом» [Бак, 2014].

Интересна точка зрения, что $1/f$ шум (фликкер-шум) является неотъемлемой особенностью всех систем, находящихся вдали от равновесия, в то время, как белый обычный шум характерен для равновесных систем.

Очевидно, можно предполагать, что фликкер-шум имеет динамическую природу, однако вынуждены констатировать, что адекватных явлению фликкер-шума моделей все еще нет. Большая часть существующих моделей связывает фликкер-шум с термодинамически равновесными флуктуационными процессами [Бочков, Кузовлев, 1983]. Обычно $1/f$ -шум достаточно слаб, однако на низких частотах он может оказываться определяющим, превышая на несколько порядков белый, особенно в неоднородных средах.

С учетом известного интегрального соотношения

$$\frac{1}{f} = \frac{2}{\pi} \int \frac{\tau}{1+(f\tau)^2} \frac{d\tau}{\tau}$$

предпринимались попытки его интерпретации как результата существования в системе очень широкого набора времен релаксации τ , суммирующихся с весом τ^{-1} .

С формальной точки зрения описание фликкер-шума оказывается близким к описанию «режима с обострением», характерному для решений многих нелинейных уравнений параболического типа. В этом контексте Ю. Климонтовичем предложена диффузионная теория фликкер-шума [Климонтович, 2002]. При этом оказалось, что фликкер-шум представляет собой некую пространственно-временную когерентную структуру.

Предпринимались попытки решения проблемы фликкер-шума в рамках стохастических процессов, с явлением перемежаемости, представляющего собой непрерывный переход от регулярного движения к хаотическому.

Но всегда ли «розовый» шум является достаточно «розовым»? Согласно работе [Зеленый, Милованов, 2004], явление СОК как сингулярного неравновесного состояния в более широком и общем смысле можно попытаться понять в контексте фундаментальных физических принципов, в частности принципа наименьшего действия, которые регулируют поведение динамических систем в наиболее общем виде. Как известно, принцип наименьшего действия – если в системе происходят некоторые изменения, то количество действия, необходимое для этого изменения, является наименьшим. Это способ получения уравнений движения физической системы с помощью поиска стационарного (часто экстремального, обычно наименьшего) значения специального функционала действия.

В рассматриваемом контексте задача состоит в том, чтобы получить СОК из минимального действия в «пространстве неравновесных (квази) стационарных состояний (НСС): из всего многообразия НСС при бесконечно медленном внешнем вынуждении самоорганизованная динамическая система выбирает то, для которого действие минимально» [Зеленый, Милованов, 2004]. Именно при достаточно медленном вынуждении, получая определенную свободу организации, стремление системы к СОК становится универсальным явлением, не зависящим от специфики системы. Тем самым, по их мнению, может быть установлено соответствие СОК фундаментальным физическим принципам, лежащим в основе современной теории динамических систем (при соответствующих ограничениях по частоте: с увеличением частоты шумы в системе, как правило, темнеют). Тем не менее эффективного критерия обнаружения СОК в текущем режиме на данный момент нет.

Ясно, что понимание сейсмичности как фундаментального следствия эволюции сейсмотектонической системы с аномально медленной динамикой ограничено и нуждается в уточнении. Как известно, кроме СОК, геосистемы демонстрируют и ряд других важных свойств сейсмичности. Это, в частности, сейсмический цикл, форшоковая и афтершоковая активности, закон Омори для афтершоков. Отмечаются различия в законе распределения обычных и сильных сейсмических событий (загиб графика повторяемости вниз для редких сильнейших (характеристических) событий) [Родкин и др., 2014].

Существуют, по меньшей мере, два класса динамических факторов, контролирующих изменение сейсмичности в крупных тектонических структурах. Это глобальный, медленно изменяющийся, контролирующий изменение во времени общего числа сильных событий, и локальный, быстро изменяющийся [Фридман и др., 2010]. Современные исследования также свидетельствуют о том, что сами сейсмические события обнаруживают признаки многоуровневых систем со сложной динамикой, включая пространственно-временную локализацию событий, автомодельность, миграцию активности по системам разломов и нарушений в земной коре.

Существенно, что только при медленном вынуждении система получает возможность определенной свободы организации и стремление к СОК становится универсальным яв-

лением [Зеленый, Милованова, 2004]. В этих условиях изучение геосистем (с учетом их принадлежности к СОК) посредством анализа регистрируемых сигналов, генерируемых системой (сейсмических каталогов, например) без априорной информации о системе, без построения модели, описывающей динамику исследуемого ряда (разумеется, не модели «куча песка»), представляет собой практически неразрешимую проблему. И существо дела здесь не в длине каталога, а скорее в присутствии шумов в системе, уровень которых должен быть достаточно малым [Лоскутов, 2010]. Как известно, наличие источников шума в нелинейных динамических системах может индуцировать режимы их функционирования, которые не могут быть реализованы при отсутствии шума. Яркий пример — стохастический резонанс, при котором отклик нелинейной системы на внешнее воздействие (даже весьма слабое) заметно усиливается с ростом интенсивности шума в системе [Анищенко и др., 2010]. Обратим также внимание на весьма важное обстоятельство: как отличить низкочастотный максимум в спектре пульсаций системы, у которой диссипация компенсируется накачкой, от фликкер-шума? [Руманов, 2013]. Стало очевидным, что именно структура шума может дать принципиально новые возможности диагностики геосистем. Но где же граница между регулярной, но сложной динамикой и хаосом, наблюдаемым в динамических системах, не подверженных влиянию внешних шумов или случайных воздействий? Основным критерий — это устойчивость системы к малым возмущениям [Лоскутов, 2010]. Сложность — зависимость отклика системы на внешнее воздействие может быть весьма различной в зависимости от условий самовозбуждения системы, в том числе и от уровня шумов в ней. Следовательно, роль шумов может оказаться значительно более существенной, чем роль эффектов и процессов, связанных с аномально медленной динамикой. С этой точки зрения сейчас кажется весьма удивительным, что парадигма прогнозируемости систем с СОК, характеризующаяся определенной универсальностью и широкой применимостью, просуществовала столь длительное время. Появилась необходимость развития неких «объединяющих концепций» прогноза динамики геосистем, разработки новых моделей, методов и, что не менее актуально, адекватных образов и понятий, возможно менее изощренных, применимых для неравновесных систем более общего типа.

Сейсмичность и автоволновые процессы.

С учетом отмеченной особенности СОК, ограниченной весьма жесткими рамками применимости к системам с аномально медленной динамикой, дальнейшее обобщение состояло в том, чтобы описать сейсмический процесс как один из элементов или видов геотектонических процессов, развивающихся во времени и пространстве, в качестве реализации некоторого нелинейного автоволнового процесса. В свете современной динамической теории неравновесных нелинейных сред сейсмический процесс — это нестационарная активность геосреды, а в более узком частном контексте — фундаментальное следствие эволюции геосистемы к состоянию СОК.

Большую роль в такой трактовке сейсмического процесса играет геометрическое представление эволюции геосистемы в мало-размерных проекциях ее фазового пространства. При этом ее поведение может быть описано в терминах аттракторов, устойчивости, бифуркаций, хаоса и т. д., а синхронизация, метастабильность, мультистабильность, синергетический характер поведения в условиях совместного действия полей напряжений, энергетического и флюидного воздействия следует рассматривать в качестве достаточно общего явления.

С этой точки зрения на передний план описания выходят вопросы изучения механизмов пространственно-временной локализации и формирования автоструктур, пространственного саморазвития автоструктур — бифуркаций их статических образов.

В зависимости от энергопотоков из низов литосферы и параметров системы в ней возможны реализация мягкого и жесткого режимов возбуждения автоструктур [Кернер, Осипов, 1989].

Слабый хаос как ключевое условие сохранения литосферы — реализация мягкого режима возбуждения. Реализация жесткого — сейсмическое событие, формирующееся за счет нестационарного внешнего воздействия, превышающего некоторый пороговый уровень. При этом хаос есть фактор обновления сложной организации геосистемы, механизм выхода на одну из возможных тенденций ее развития и способ сохранения целостности, фактор приспособления к изменениям в окружающей среде.

Предполагается, что связующим звеном между топологией автоструктур и их динамикой может являться представление о неравно-

весном квазистационарном состоянии (фазе с обострением), переход к которому в условиях обмена энергией и веществом реализуется пороговым образом.

Однако в ансамблях структур, состоящих из очень большого числа элементов, обычно значительно расширяется область параметров, где весьма затруднительно или даже невозможно отслеживать пространственные образы, которым в фазовом пространстве соответствует аттрактор. В данной области параметров оказываются наблюдаемыми лишь метастабильные (переходные) образы, которым в фазовом пространстве рассматриваемой модели соответствуют уже не аттракторы, а переходные множества траекторий [Гапонов-Грехов, Рабинович, 1987а,б]. В этом случае задача о бифуркациях системы для теории пространственных образов на основе ее фазового пространства из-за своей сложности оказывается практически неразрешимой. Заметим, что сильная нелинейность также разрушает фазовое пространство системы. С учетом этих обстоятельств можно попытаться дать более адекватное определение сейсмического процесса как результата устойчивой переходной активности геосреды с конечной во времени плотностью потоков энергии и вещества, связанной с переходами пространственных образов как последовательность неравновесных квазистационарных состояний, обусловленных взаимодействием ее подсистем и их ансамблей — постройкой ритмов осциллирующих объектов и подавлением одних колебательных мод другими. Ясно, что стремление геосистем к СОК (критическим режимам), являющегося следствием физического принципа минимальности действия в пространстве неравновесных квазистационарных состояний, только в этом частном случае становится универсальным явлением, не зависящим от специфики системы [Зеленый, Милованов, 2004].

Следовательно, современной сейсмичности соответствует и геосреда, и переходный динамический процесс, обусловленный существованием метастабильных состояний и структурной устойчивостью переходных режимов. В итоге представляется заманчивой идея рассматривать вместо аттракторов, которым соответствуют устойчивые состояния равновесия, теорию переходов пространственных образов (превращений одних образов в другие) — «устойчивые переходные движения вместо аттракторов» [Рабинович, Мюезинолу, 2010]. В этом случае шумы различной природы,

интенсивности и цветности, очевидно, могут проявляться только на определенном, соответствующим их масштабу, иерархическом уровне структурной и термодинамической организации.

Возбудимые среды и автоструктуры. Как уже отмечалось, геосреда — это неравновесная система, относящаяся к классу так называемых возбудимых сред, которые имеют конечный порог неустойчивости. Внешнее воздействие, превышающее пороговый уровень, способно вывести некоторые ее элементы из устойчивого состояния и заставить систему совершать некоторую эволюцию. Если эволюция системы контролируется минимумом производства энтропии, происходит образование динамических структур. Для процессов структурообразования в подобных средах наиболее характерно «саморазвитие» структур в пространстве, сосуществование локализованных возбуждений, мультистабильность, развитие пространственно-неупорядоченных структур, самозарождение устойчивых локализованных образований — автоструктур, превращение одних структур в другие — при изменении параметров среды — бифуркации пространственных образов [Гапонов-Грехов, Рабинович, 1987а,б], наличие пространственных флуктуаций или пространственных шумов, хаотическая динамика ансамблей их подсистем и их синхронизация.

Понятие структуры весьма широкое. Оно лежит в основе современной математики. В реальных системах обычно имеют дело с пространственными или временными структурами. При этом пространственно-временная структура является всеобщим и фундаментальным свойством материи [Эбелинг, 1979].

Напомним в этой связи, что в соответствии с принципом максимальной диссипации [Гараненко и др., 2008], структура в системе возникает спонтанно, если система со структурой обладает большей диссипацией, чем система без структур. Под структурой системы обычно понимают способ организации ее элементов и характер связи между ними. Определенный класс пространственно-временных структур в неравновесных средах получил название автоволновых. Автоволны — одни из важнейших факторов в самоорганизации в термодинамических открытых неравновесных системах, один из видов самоподдерживающихся волн в возбудимых (активных) средах, которые содержат внутренние распределенные источники энергии. Автоструктуры — локализованные

пространственные образования, устойчиво существующие в диссипативных неравновесных средах.

Как известно, высокоорганизованные пространственные структуры в средах с диссипацией, далеких от термодинамического равновесия, представляют собой одну из областей физики. При этом наиболее актуальным является исследование формирования и динамики автоструктур [Рабинович, Суцик 1990; Турунтаев и др., 2012]. Автоструктуры — весьма нетривиальный объект. Выделяют динамические, локализованные, статические, стационарные, уединенные автоструктуры. Независимость (в некоторых пределах) от конечных изменений граничных и начальных условий — главное свойство автоструктур, что оказывается возможным лишь в средах с диссипацией. Существенно, что в реальных физических экспериментах обычно наблюдаются не индивидуальные автоструктуры, а их ансамбли — ансамбли связанных автоструктур [Рабинович, Суцик 1990; Гапонов-Грехов, Рабинович, 1987].

Исследование динамики пространственных ансамблей автоструктур сопряжено обычно с постановкой новых нетривиальных задач, в частности задачи о пространственных бифуркациях, развивающихся на фоне изменения параметров системы, а в пространстве — вдоль энергомассопотока, является весьма сложной задачей. Она гораздо сложнее задач теории бифуркаций динамических систем: если на основании классической теории бифуркаций в динамической системе в принципе можно предсказать все возможные ее движения на основании элементов ее фазового пространства, то для теории переходов пространственных образов такая постановка задачи выглядит нереальной [Гапонов-Грехов, Рабинович, 1987а, б]. В этом случае аналитические возможности исследования автоструктур и динамики их ансамблей, как уже отмечалось, оказываются ограниченными рамками некоторых модельных уравнений, что весьма экзотично. Численное же их исследование весьма затруднено и требует чрезвычайно много времени.

Таким образом, изучение механизмов пространственно-временной локализации и формирования автоструктур, их пространственного саморазвития — бифуркаций статических образов в зависимости от параметров энергопотока и уровня шумов в системе, остается весьма актуальной задачей. Можно предполагать, что связующим звеном между

топологией автоструктур (и, вероятно, топологией межблочной системы) и ее динамикой является представление о неравновесном квазистационарном состоянии геосистемы (фазе с обострением), переход к которому осуществляется при некотором условии (или пороге) обмена энергией и веществом с внешней средой — за счет многомасштабных корреляций в пространстве и времени. При этом пространственные корреляции обнаруживают себя в характеристиках (параметрах) автоструктур, которые, в свою очередь, отражаются в структуре и динамике спонтанного излучения, регистрируемого в геосреде. Заметим в этой связи, что диссипация может осуществляться за счет генерации автоструктурой излучений различной физической природы. При этом проблема перестройки пространственных излучений в среде — это проблема, связанная с бифуркациями в пространственных ансамблях автоструктур, превращений одних пространственных образований в другие.

Но как экспериментально можно обнаружить и диагностировать эти пространственные образы и получить представление в динамике превращений одних пространственных образований в другие?

Ответ почти очевиден, если вспомнить, что спонтанная эмиссия — и сейсмическая, и электромагнитная, является отражением собственной эволюции геосистемы, а его спектр отражает стадию этой эволюции [Шуман, 2014а, б; 2015]. Природа спонтанной эмиссии — трансформация собственной энергии геосреды в различные локально неустойчивые состояния, которые и становятся ее источниками при различных внешних энергетических воздействиях. Весьма существенно, что спонтанные эмиссии, в отличие от вынужденных излучений, не зависят от этих внешних вынуждающих воздействий, а определяются только свойствами геосистемы. При этом, разумеется, следует предусмотреть возможность различного физического содержания процессов генерации спонтанных эмиссий — и сейсмоакустической, и электромагнитной, на разных уровнях геометрически самоподобной блоковой системы.

Как известно, к настоящему времени лучше всего изучены процессы в возбудимых (активных) средах, где их элементы и подсистемы связаны между собой диффузионным способом. Подобные среды описываются параболическими нелинейными уравнениями типа «реакция—диффузия» вида

$$\frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t} = D\Delta^2 \mathbf{W} + \mathbf{F}(\mathbf{W}),$$

где \mathbf{W} — вектор состояния элементарного объема возбудимой среды, D — матрица (коэффициент) диффузии, $\mathbf{F}(\mathbf{W})$ — нелинейная векторная функция, интегрально задающая интенсивность соответствующих преобразований, в частности механизмов механоэлектромагнитных преобразований. При этом специфические возбудимые свойства геосреды определяются формой нелинейной функции $\mathbf{F}(\mathbf{W})$ [Давыдов и др., 1991].

В последние годы спонтанному сейсмоэлектромагнитному шуму (спонтанной эмиссии) придается самостоятельное значение [Хаякава, Коровкин, 2011; Шуман 2014а, б; 2015], а на передний план выходят задачи синтеза теории переходов пространственных образов и сейсмоэлектромагнетизма. Это связано с тем, что переход к неравновесному квазистационарному состоянию геосистемы, реализуемому при некотором пороге обмена энергией и веществом с окружающей средой, обнаруживает себя в характеристиках автоструктур, которые, в свою очередь, отражаются в структуре и динамике спонтанных эмиссий литосферного происхождения. Как уже отмечалось, эти эмиссии обладают упорядоченной структурой и динамикой геосреды, в частности связаны с геометрией ее межблочной структуры. Весьма примечательно, что спонтанные эмиссии, которые можно назвать геометрическим шумом литосферы, также могут быть истолкованы в терминах автоколебаний.

Автоструктуры и спонтанные эмиссии литосферы. Как уже упоминалось, эволюция процессов и объектов в литосфере не может рассматриваться вне рамок автоволновых пространственно-временных структур. Установлено, что геосистемы способны формировать различные пространственно-временные структуры активности, представляющие собой импульсы и фронты возбуждения, неустойчивость которых ведет к установлению в них самоподдерживающихся колебаний с определенной пространственной конфигурацией. При этом каждый из элементов или подсистем генерирует последовательность импульсов возбуждения с различной пространственной частотой. Автоколебания взаимодействуют между собой, формируя в неоднородной геосреде более устойчивую и геометрически простую конфигурацию со стоячими волнами [Васильев и др., 1979].

Автоволновые структуры возникают в системах, неравновесность которых определяется величиной энергомассопотоков, а их тип — характерными пространственно-временными масштабами этих потоков. Реализуется «мягкий» или «жесткий» режим возбуждения автоструктур [Кернер, Осипов, 1989], причем разрывные (релаксационные) автоколебания с частичным сбросом энергии в процессе своей эволюции в виде электромагнитной и сейсмической спонтанной эмиссии активно способствуют изменению их естественного фона, регистрируемого в геосреде и на ее поверхности. В более широком контексте спонтанные эмиссии могут быть истолкованы как некоторый суммарный, интегральный эффект проявления движений различного рода в земной коре и всей литосфере, особенностей их строения, напряженно-деформированного состояния и процессов разрушения на различных масштабных уровнях — от локальных очаговых областей до глобальных сейсмоэлектромагнитогенерирующих структур. Это — результат устойчивой переходной активности геосреды, способов релаксации накопленных напряжений и многочисленных физических механизмов их генерации, определенных, в конечном счете, плотностью потоков энергии и вещества из низов литосферы и их пространственно-временными параметрами. При этом рождение диссипативных структур (автоструктур) носит пороговый характер: новая структура всегда является результатом неустойчивости системы и возникает из флуктуаций, причем спонтанные эмиссии — их чувствительный и надежный индикатор.

К настоящему времени накоплены достаточно обширные экспериментальные и теоретические свидетельства реальности существования спонтанной эмиссии литосферного происхождения [Гульельми, 2007; Чеботарева, 2011; Шуман и др., 2012]. Однако трудности ее описания и интерпретации, очевидно по причине онтологической сложности этого объекта исследований, все еще остаются весьма значительными [Шуман, 2012].

В рассматриваемом контексте принципиально важное значение имеет известная флуктуационно-диссипативная теорема физики, смысл которой состоит в том, что механизм любой диссипации является одновременно и механизмом рождения флуктуаций [Кадоццев, 1994]. В итоге по причине того, что просачивание флюидов и легких газов из верхней мантии носит, как принято считать, диффузионную

природу, можно предположить о возможности реализации условий для возникновения спонтанных эмиссий (геометрического шума).

Но каковы конкретные физические механизмы, превращающие геосистемы в распределенный генератор спонтанных эмиссий, в частности сейсмоэлектромагнитных? Как известно, их не так мало. Не претендуя на анализ или даже на перечисление их совокупности (более детальные сведения приведены в работах [Сурков, 2000; Гульельми, 2007; Чеботарева, 2011; Шуман, 2012]), укажем на некоторые из них.

В частности, один из возможных механизмов основан на фрактальной модели сейсмогенеза — самосогласованной перколяционной модели распределенной сейсмичности, обусловленной и связанной с перколяционной неустойчивостью дегазирующего субстрата литосферы [Иудин, 2005]. Примечательно, что именно процессы дегазации и, соответственно, механизм перколяционной неустойчивости, насыщенной флюидами и легкими газами литосферы, превращают ее в распределенный сейсмический генератор. С процессами дегазации, с пространственно-временными потоками энергии и вещества из низов литосферы (верхней мантии) могут быть связаны и механизмы генерации электромагнитной эмиссии. В этом случае в качестве базового механизма генерации очевидно может быть принято переходное фрактальное рассеивание волн (возмущения) диэлектрической проницаемости (появление которой также обусловлено процессами дегазации) на зарядах, сгустках зарядов или диполей, содержащихся в геосреде или возникающих в ней в течение этих процессов. При этом любое переходное излучение можно рассматривать как следствие процесса трансформации возмущения проницаемости с образованием электромагнитных, а в принципе, и других типов волн [Гинзбург, Цытович, 1984].

Разумеется, для низкочастотных возмущений диэлектрической проницаемости рассеивание возможно только в том случае, если их частота лежит в окне прозрачности геосреды. Но, во-первых, восходящие флюидные и газовые потоки сопряжены с образованиями фрактальных агрегатов в таких системах, что резко увеличивает мощность генерируемого в них излучения и возможности его выхода из земных недр на дневную поверхность. Во-вторых, наличие в среде магнитного поля земного ядра также меняет суть дела: в этом случае возмож-

но формирование и распространение спиральных (геликоидальных) волн (или автоволн), весьма слабо затухающих низкочастотных колебаний. При этом, разумеется, следует учитывать возможность различного физического содержания процессов генерации спонтанных излучений различной природы на разных пространственно-временных масштабах. С этой точки зрения как-то противопоставлять или разграничивать спонтанные сейсмические (сейсмоакустические) и электромагнитные шумы литосферного происхождения как универсального свойства геосреды далеко не очевидно и не всегда целесообразно.

О формировании очагов. Ввиду исключительной сложности динамики геосистем и происходящих в них процессов до настоящего времени вопрос о фундаментальных основах физики и механики формирования очагов сейсмических процессов остается открытым [Пантелеев и др., 2012; Гуфельд, 2007; Гульельми, 2015]. Остаются нерешенными ключевые вопросы физики и механики разрушения и сейсмических явлений в земной коре. Отсутствует адекватная реологическая модель геодинамических процессов в мантии и литосфере, рассматриваемой в качестве холодного пограничного слоя, сформированного мантийной конвекцией [Биргер, 2012].

Очевидно, сегодня преобладают две качественные модели подготовки сейсмических событий. Это дилатантная, в основу которой положена зависимость объемных деформаций касательных воздействий и лавинно-устойчивого трещинообразования, процессы в которой связываются с особенностями взаимодействующих между собой трещин. Получили признание подходы, в соответствии с которыми развитие процесса очага может быть представлено в рамках эволюции неравновесных динамических систем с характерным типом критических явлений — структурно-скейлинговыми переходами, самоорганизованной критичностью и закономерностями пространственно-временного скейлинга при реализации сейсмических событий [Наймарк, 2008].

Предложена физико-химическая модель сейсмичности, в основе которой лежит представление о реакции блочной геосреды на взаимодействие с восходящими потоками легких газов [Гуфельд, 2007]. Однако, хотя современное понимание процессов и структуры геосреды, несомненно, дает основание для оптимизма, отмечается [Гуфельд, 2013] и

некая безысходность в представлении о сейсмическом процессе. В этом контексте с учетом многообразия модельных геофизических систем представляется привлекательной идея построения некой, хотя бы и достаточно грубой феноменологической модели сейсмичности. Однако на протяжении длительного времени эта идея не находила широкого признания, поскольку построенные на ее основе примеры носили весьма абстрактный характер и, вообще говоря, было неясно, имеют ли подобные представления какое-либо отношение к реальности. И лишь в последние годы ситуация начала изменяться. Предприняты попытки связать формирование очаговой зоны землетрясения с процессами, снижающими скорость диссипации энергии в некоторой локальной области геосреды, а следовательно, и скорости роста энтропии [Шаповал, Шнирман, 2011]. Это — процесс в некоторой области открытой неравновесной и самоорганизованной системы, удовлетворяющий принципу минимального производства энтропии. При этом зарождение локальных областей (состояний с низкой энтропией) в конечном счете ведет к ускорению общего роста энтропии всей системы в целом. В этом случае, если эволюция системы контролируется минимумом производства энтропии (неравновесные условия), происходит самоорганизация диссипативных структур. Как известно, термин «диссипативная структура» подчеркивает термодинамический аспект проблемы: они появляются и существуют в термодинамически открытых системах за счет диссипативных процессов утилизации энергии и энтропии [Васильев и др., 1979, с. 652].

Часто под диссипативными структурами понимается комплекс явлений самоорганизации в неравновесных средах. Очевидно, в принципиальном плане способность к самоорганизации в диссипативных средах, которые описываются нелинейным уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha T^l + \frac{\partial}{\partial r} \left(\beta T^m \frac{\partial}{\partial r} T \right),$$

где α , β , l , m — некоторые константы, T — температура, была теоретически установлена еще в 1977 г. [Самарский и др., 1977]. Среди предсказанных эффектов отметим следующие:

– образование метастабильной локализации тепла в некоторой локальной области среды, размер (фундаментальная длина) которой

$$L \approx \sqrt{\frac{\beta T^m}{\alpha T^l}} = \sqrt{\frac{\beta}{\alpha}} T \frac{m-l}{2};$$

– в случае возникновения нескольких таких областей метастабильной локализации они взаимодействуют между собой.

Существенно, что предпочтение, отдаваемое критическим режимам функционирования, обусловлено их относительным термодинамическим преимуществом — свободная энергия ансамблей ее подсистем понижается при формировании пороговых конструкций. При этом неравновесное критическое состояние системы (фазы с обострением), переход к которому осуществляется пороговым образом (некотором пороге обмена энергией и веществом с окружающей средой), реализуется за счет многомасштабных корреляций в пространстве и времени. В случае резонанса система минимально излучает и максимально запасает энергию. При резком снижении скорости диссипации поступающей в эту область геосистемы энергии оказывается неизбежным ее выброс.

Примечательно, что при таком подходе, который может быть назван термодинамическим, не имеет принципиального значения природа источника напряжений в земной коре. Далее, весьма важно, что эволюция процессов и объектов в литосфере не может осуществляться вне рамок автоволновых процессов, являющихся пространственно-временными структурами. Сами сейсмические события, а также их форшоки и афтершоки связаны с трансформацией автоволновых структур в диссипативные структуры обострения, требуют для своего существования постоянного притока энергии и вещества. При этом формирование очаговой зоны определяется как уровнем и скоростью изменений пронизывающих систему энергопотоков, так и топологией дефектов на каждом пространственном масштабе. В итоге формирование очага оказывается тесно связанным с автоструктурой большой амплитуды (жесткий режим возбуждения), в то время как слабый хаос (спонтанный фон излучений различной природы — геометрический шум литосферы) может интерпретироваться в качестве реализации мягкого режима возбуждения. Возникает естественная задача изучения механизмов пространственно-временной локализации и формирование автоструктур, их пространственного саморазвития в зависимости от параметров энергопотока и уровня шумов в системе.

Весьма заманчиво, что при таком подходе, как уже отмечалось, можно попытаться уклониться от сложных вопросов природы напряжений и механики разрушения, в частности отклика геосреды с дефектами на внешнюю нагрузку, а получаемые результаты моделирования процесса формирования очага вмонтировать в эту достаточно грубую схему.

Некоторые замечания и комментарии. Очевидно, современные методы моделирования и прогноза сейсмичности в своем большинстве опираются на концепцию самоорганизованной критичности как одну из парадигм современной нелинейной физики и, в принципе, находятся в русле идей и методов теории динамических систем, задекларированных еще в 70—80-х годах прошлого века. Это позволило по-новому взглянуть на новые геофизические факты, представления и процессы. В частности, с учетом экспериментально обнаруженных степенных распределений и автомодельных свойств сейсмичности принято считать, что процесс подготовки сейсмических событий порождается типичной системой с СОК. Как неотъемлемое проявление СОК интерпретируется фрактальная динамика активных геосистем [Иудин, 2005]. По данным обширных каталогов землетрясений определена фрактальная природа сейсмичности различных сейсмоактивных зон [Захаров, 2014]. Принято считать, что фрактальные структуры и $1/f$ -шум (фликкер-шум) — соответственно, пространственные и временные срезы самоорганизации [Бак, 2014].

Исследованы теоретические аспекты и особенности прогнозируемости в ряде математических моделей с СОК, демонстрирующих основные, грубые свойства сейсмичности. Однако из-за сложности проблемы прогнозируемости систем с СОК она исследовалась, в основном, эмпирически [Шаповал, 2011]. Несмотря на понимание связи СОК с аномально медленной динамикой систем, это все еще в значительной степени эмпирическая концепция без должного теоретического обоснования. До настоящего времени нет эффективного критерия СОК геосистемы в текущем режиме, нет и общей теории, охватывающей широкий спектр расходимостей типа $1/f^\beta$. К тому же экспериментально установлены и существенные различия в законах распределения обычных и сильных сейсмических событий [Родкин и др., 2014]. Стало очевидным, что задача прогноза, особенно краткосрочного, значительно сложнее, чем это предполагалось еще совсем

недавно, и выходит за рамки устоявшихся представлений. Уже в своей постановке она нуждается в коррекции. В частности, понимание сейсмического процесса в качестве фундаментального следствия эволюции геосистемы к состоянию СОК ограничено рамками динамики систем с аномально медленной динамикой [Зеленый, Милованов, 2004]. При этом «стационарность модельной системы имеет место лишь на чрезвычайно длинных временных интервалах, соответствующих десятилетиям эволюции сейсмического процесса» [Шаповал, 2011].

Примечательно, что в центре исследований современной сейсмологии оказались высокоорганизованные пространственные структуры в диссипативных средах, далеких от термодинамического равновесия. Стала очевидной потребность смены классической парадигмы СОК на новую. В частности, это может быть парадигма переходов (бифуркаций) пространственных образов в неоднородной активной (возбудимой) геосреде, которые находят отражение в структуре и динамике спонтанных эмиссий.

С позиций современной нелинейной динамики можно попытаться дать иную феноменологическую трактовку сейсмического процесса. В частности, он может быть истолкован как результат устойчивой переходной активности энергонасыщенной геосистемы с конечной во времени плотностью потоков энергии и вещества. Это последовательность неравновесных квазистационарных состояний (ННС) геосистем, переходы к которым реализуются посредством механизмов бифуркаций и хаоса. В определенном смысле сейсмический процесс — это метастабильные состояния геосреды и последовательность таких состояний. При этом переход к ННС реализуется при некотором пороге обмена энергией и веществом с окружающей средой и определяется уровнем шумов в системе путем многомасштабных корреляций в пространстве и времени. В этом контексте одной из важнейших задач является исследование влияния шумов различной интенсивности и цветности на динамику пространственных ансамблей автоструктур и превращений одних пространственных образов в другие.

Существенно, что пространственные корреляции обнаруживают себя в пространственных структурных характеристиках автоструктур и, соответственно, спонтанных излучений — сейсмических, сейсмоакустических, электромагнитных. Механическая сторона этой

проблемы — рассмотрение деформируемой геосреды как нелинейной многоуровневой системы, которое позволяет определить механизмы формирования локальных зон сильно-неравновесных состояний, в которых зарождаются деформационные дефекты различного масштабного уровня [Макаров, 2012]. С этой точки зрения землетрясение ассоциируется с автоструктурой большой амплитуды, трансформирующейся в диссипативную структуру с обострением пороговым образом (жесткий режим возбуждения), фоновая сейсмичность — с трансформациями автоструктур малой амплитуды (слабый хаос, мягкий режим возбуждения). Слабость хаоса — ключевое условие существования литосферы. Но в ансамблях структур, состоящих из большого числа элементов, пространственные образы, которым в фазовом пространстве соответствует аттрактор, фактически ненаблюдаемы. Оказываются наблюдаемыми лишь переходные метастабильные образы, которым в фазовом пространстве модели соответствуют уже не аттракторы, а переходные множества траекторий [Гапонов-Грехов, Рабинович, 1987].

Напомним в этой связи, что геометрический образ метастабильного состояния в фазовом пространстве модели — это седло, а переходу из одного метастабильного состояния в другой соответствует неустойчивая сепаратриса седла [Рабинович, Мюезинолу, 2010]. Но, так как время, проводимое системой в окрестности седлового равновесия, обратно пропорционально логарифму уровня шумов, характерное время переходного процесса может быть весьма большим и изменяться в широких пределах. Связь между топологией автоструктур и их динамикой реализуется посредством представлений о неравновесных квазистационарных состояниях геосистемы, одним из важных свойств которых является стремление к СОК, обусловленное ее (геосистемы) термодинамикой.

Заключение. Какие выводы можно сделать, исходя из современного состояния исследований по вопросам прогнозируемости сейсмического процесса и его реализации в отношении конкретных сейсмических событий? Очевидно, в сжатой форме с привлечением некоторых идей и методов теории активных динамических систем наиболее значимые из них, по мнению автора, могут быть сформулированы в следующем виде.

1. Показано теоретически и экспериментально установлен факт весьма быстрых изменений параметров геосистем и сред с ак-

тивными внутренними источниками энергии. Это, вообще говоря, выводит их за рамки систем с аномально медленной динамикой, когда стремление к СОК становится универсальным явлением, не зависящим от их специфики, и определенно требует развития более обоснованного инструментария исследований, более адекватных образов и понятий, типичных для систем более общей природы.

2. Очевидно, для будущих экспериментальных работ в этой области наиболее приемлемыми являются исследования процессов формирования автоструктур, их превращений при изменении параметров геосистем, их хаотической динамики («структурной турбулентности») и их отражении в пространственно-временной мозаике полей спонтанных эмиссий, генерируемых в литосфере.

3. Имеются весомые аргументы в необходимости смены парадигмы СОК и понимания сейсмичности как фундаментального следствия эволюции сейсмотектонических систем с аномально медленной динамикой на новую — парадигму переходов пространственных образов в неоднородной активной (возбудимой) геосреде и интерпретации сейсмичности в качестве реализации некоторого нелинейного автоволнового процесса.

4. Наличие источников шума в нелинейных динамических геосистемах может индуцировать режимы их функционирования, которые не могут быть реализованы в его отсутствие.

5. Среди приоритетных исследований, позволяющих приблизить ситуацию к экспериментальной, можно назвать:

- изучение процессов и механизмов пространственно-временной локализации и формирования пространственных ансамблей автоструктур, в частности их пространственно-го развития и трансформации в диссипативные структуры с обострением;

- исследование хаотической синхронизации как естественного развития теории динамического хаоса, изучения пространственного хаоса и его роли в формировании пространственных ансамблей структур, взаимоотношений пространственного и временного хаоса и его связи с динамикой геосистем;

- синтез идей нелинейной динамики и сейсмоэлектромагнетизма, изучение пространственно-временной структуры и динамики спонтанных эмиссий, их статических портретов и распространяющихся фронтов синхронизации, роста автокорреляции и вариабельности;

– теоретический и экспериментальный анализ механизмов реализации процессов деформирования и способов релаксации накапливаемых напряжений.

Несомненно, эти задачи весьма сложны, многогранны и в значительной степени междисциплинарны. Однако проблемы, связанные с их решением в свете современных теоретиче-

ских и экспериментальных наработок и новых технических и технологических возможностей, отнюдь не кажутся безнадежными, но, очевидно, требуют разработки некоторой глобальной программы, глобального проекта динамической сейсмологии и сейсмоэлектромагнетизма. И такая программа представляется вполне реальной и выполнимой в обозримом будущем.

Список литературы

- Анищенко В. С., Вагивасова Т. Е., Стрелкова Г. И. Автоколебания динамических и стохастических систем и их математический образ — аттрактор. *Нелинейная динамика*. 2010. Т. 6. № 1. С. 107—126.
- Бак П. Как работает природа. Москва: Книжный дом «Либроком», 2014. 276 с.
- Биргер Б. И. Неустановившаяся ползучесть и ее роль в геодинамике. *Физика Земли*. 2012. № 6. С. 34—42.
- Бочков Г. Н., Кузовлев Ю. Е. Новое в исследованиях 1/f-шума. *Успехи физ. наук*. 1983. Т. 141. Вып. 1. С. 151—176.
- 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.
- Гапонов-Грехов А. В., Рабинович М. И. Нелинейная динамика неравномерных сред: структуры и турбулентность. *Успехи физ. наук*. 1987а. Т. 152. Вып. 5. С. 159—162.
- Гапонов-Грехов А. В., Рабинович М. И. Автоструктуры. Хаотическая динамика ансамблей. В сб.: *Нелинейные волны. Структуры и бифуркации*. Москва: Наука, 1987б. С. 7—47.
- Гинзбург В. Л., Цытович В. Н. Переходное излучение и переходное рассеяние (некоторые вопросы теории). Москва: Наука, 1984. 360 с.
- Гульельми А. В. Ультранизкочастотные волны в коре и в магнитосфере Земли. *Успехи физ. наук*. 2007. Т. 177. № 12. С. 1257—1276.
- Гульельми А. В. Форшоки и афтершоки сильных землетрясений в свете теории катастроф. *Успехи физ. наук*. 2015. Т. 185. № 4. С. 415—429.
- Гуфельд И. Л. Возможен ли прогноз сильных коровых землетрясений? *Вестник РАН*. 2013. Т. 83. № 3. С. 236—245.
- Гуфельд И. Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Королев: ЦНИИМаш, 2007. 160 с.
- Гуфельд И. Л., Новоселов О. Н. Сейсмический процесс в зоне субдукции. Мониторинг фонового режима. Москва: Изд-во МГУЛ, 2014. 100 с.
- Давыдов В. А., Зыков В. С., Михайлов А. С. Кинематика автоволновых структур в возбудимых средах. *Успехи физ. наук*. 1991. Т. 161. № 8. С. 45—86.
- Захаров В. С. Самоподобие структур и процессов в литосфере по результатам фрактального и динамического анализа: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Москва, 2014. 35 с.
- Зеленый Л. М., Милованов А. В. Фрактальная топология и странная кинетика: от теории перколяции к проблемам космической электродинамики. *Успехи физ. наук*. 2004. Т. 174. № 8. С. 810—851.
- Иудин Д. И. Фрактальная динамика активных систем: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 2005. 30 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. 137. Вып. 2. С. 201—261.
- Климонтович Ю. Введение в физику открытых систем. Москва: Янус-К, 2002. 284 с.
- Короновский Н., Наймарк А. Непредсказуемость землетрясений как фундаментальное следствие нелинейности геодинамических систем. *Вестник Моск. ун-та*. 2012. Сер. 4. № 6. С. 3—11.
- Лоскутов А. Ю. Очарование хаоса. *Успехи физ. наук*. 2010. Т. 180. № 2. С. 1305—1329.
- Макаров Н. В. Возможности современных методов геомеханического моделирования в приложении к задачам наук о Земле. Москва: Изд. МФЗ РАН, 2012. 14 с.
- Наймарк О. Б. Структурно-скейлинговые переходы

- и автомодельные закономерности развития землетрясений. *Физическая мезомеханика*. 2008. Т. 1. № 2. С. 89—106.
- Наймарк А. А., Захаров В. С. О соотношениях направленности, цикличности и нелинейности в геологических процессах. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2012. Вып. 19. № 1. С. 181—189.
- Пантелеев И. А., Плехов О. А., Наймарк О. Б. Нелинейная динамика структур обострения в ансамблях дефектов как механизм формирования очагов землетрясений. *Физика Земли*. 2012. № 6. С. 43—55.
- Рабинович М. И., Мюезинолу М. К. Нелинейная динамика мозга: Эмоции и интеллектуальная деятельность. *Успехи физ. наук*. 2010. Т. 180. № 4. С. 371—387.
- Рабинович М. И., Суцник М. М. Регуляторная и хаотическая динамика структур в течениях жидкости. *Успехи физ. наук*. 1990. Т. 160. Вып. 1. С. 3—63.
- Родкин М. В., Писаренко В. Ф., Нго Тхи Ли, Рукавишников Т. А. О возможных реализациях закона распределения редких сильнейших землетрясений. *Электронный журнал «Геодинамика и тектонофизика»*. 2014. Т. 5. № 4. С. 893—904.
- Руманов Э. Н. Критические явления вдали от равновесия. *Успехи физ. наук*. 2013. Т. 183. № 1. С. 103—112.
- Самарский А. А., Еленин Г. Г., Змитренко Н. В., Курдюмов С. Г. Горение нелинейной среды в виде сложных структур. *Докл. АН СССР*. 1977. Т. 237. № 6. С. 1330—1333.
- Сурков В. В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. Москва: Изд. Моск. инж.-физ. ин-та, 2000. 235 с.
- Тараненко В. Б., Слексис С. П., Вайсс К. О. Пространственные резонаторные солитоны. В кн.: *Диссипативные солитоны*. Москва: Физматлит, 2008. С. 109—200.
- Турунтаев С. Б., Ворохобина С. В., Мельчаева О. Ю. Выявление техногенных изменений сейсмического режима при помощи методов нелинейной динамики. *Физика Земли*. 2012. № 3. С. 52—65.
- Фригман А. М., Поляченко Е. В., Насырканов Н. Р. О некоторых корреляциях в сейсμοдинاميке и двух компонентах сейсмической активности Земли. *Успехи физ. наук*. 2010. Т. 180. № 3. С. 303—312.
- Хаякава М., Коровкин Н. В. Сейсμοэлектромагнитные явления как новая область исследования радиоволновых явлений: *XII Всемирный электро-технический конгресс. ВЭЛК 2011. 4—5 октября 2011 г. Доклады и презентации*. <http://www.ruscable.ru/article/report/>
- Чеботарева И. А. Структура и динамика геосреды в шумовых сейсмических полях. Методы и экспериментальные результаты. Акустика неоднородных сред. *Ежегодник РАО*. 2011. Вып. 12. С. 147—156.
- Шаповал А. Б. Вопросы прогнозируемости в изотропных моделях с самоорганизованной критичностью: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2011. 35 с.
- Шаповал А. Б., Шнирман М. Г. Универсальность алгоритмического прогноза экстремальных событий временных рядов. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2011. № 4. С. 58—65.
- Шуман В. Н. Нелинейная динамика геосреды: переходные процессы и критические явления. *Геофиз. журн.* 2014а. Т. 36. № 6. С. 129—142.
- Шуман В. Н. Нелинейная динамика, сейсмичность и аэрокосмические зондирующие системы. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 2. С. 38—55.
- Шуман В. Н. Сейсмический процесс и современные мониторинговые системы. *Геофиз. журн.* 2014б. Т. 36. № 4. С. 50—64.
- Шуман В. Н. Электродинамика фрактальных сред, переходное фрактальное рассеяние и электромагнитный шум литосферы. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 1. С. 3—13.
- Шуман В. Н., Коболев В. П., Старостенко В. И., Буркинский И. Б., Лойко Н. П., Захаров И. Г., Яцюта Д. А. Метод анализа спонтанной электромагнитной эмиссии Земли: физические предпосылки, полевой эксперимент, элементы теории. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 4. С. 40—61.
- Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. Введение в теорию диссипативных структур. Москва: Мир, 1979. 277 с.
- Aschwanden M. J., Crosby N. B., Dimitropoulou M., Georgoulis M. K., Hergarten S., McAteer J., Milovanov A. V., Mineshige S., Morales L., Nishizuka N., Pruessner G., Sanchez R., Sharma A. S., Strugarek A., Uritsky V., 2014. 25 Years of Self-Organized Criticality: Solar and Astrophysics. *Space Sci. Rev.*, 1—120. doi 10.1007/S. 11214-014-0054-6.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K., 1987. Self-Organized Criticality: an Explanations of 1/f Noise. *Phys. Rev. Lett.* 59, 381—384.
- Geller R. J., 1997. Earthquake production: A critical review. *Geophys. J. Int.* 131, 425—450.

Seismoelectromagnetism and spatio-temporal structures

© V. N. Shuman, 2015

New ideas, approaches and methods of modern seismology are being considered, which are focused on highly organized spatio-temporal structures in dissipative media far from thermodynamic equilibrium, auto-structures in particular. Some details of studies conducted and some of their consequences, which were paid not enough attention but which might be decisive to conduct further studies are being considered. In this case, instead of widespread understanding of seismicity as a fundamental consequence of evolution of geo-systems toward the state of self-organized criticality limited to the framework of systems with anomalously slow dynamics, its interpretation as meta-stable states of geo-medium and the succession of such states is under consideration. The essence of new approach is a paradigm of transitions of spatial shapes in heterogenous multi-scale hierarchically organized active geo-medium, which are reflected in the spatial structure of spontaneous emissions of lithospheric origin – seismic and electromagnetic ones. Here the problems of the theory of transitions of spatial shapes instead of known problems of the theory of bifurcations of dynamic systems are brought to the fore. The role and impact on dynamic processes running into geo-medium of noise of different intensity and chromaticity, which promote induction of the regimes of its functioning, impossible to be realized without are being accentuated. Possible and visible applications of the proposed approach are being discussed.

Key words: seismicity, seismic process, self-organized criticality, auto-wave processes, auto-structures, spontaneous emissions, predictability of geo-systems.

References

- Anishchenko V. S., Vadivasova T. E., Strelkova G. I., 2010. Self-sustained oscillations of dynamical and stochastic systems and their mathematical image — an attractor. *Nelineynaya dinamika* 6(1), 107—126 (in Russian).
- Bak P., 2014. How does nature. Moscow: Book House «Librokom», 276 p. (in Russian).
- Birger B. I., 2012. Transient creep and its role in geodynamics. *Fizika Zemli* (6), 34—42 (in Russian).
- Bochkov G. N., Kuzovlev Yu. E., 1983. New research 1/f-noise. *Uspekhi fizicheskikh nauk* 152(is. 1), 151—176 (in Russian).
- Vasiliev A. N., Romanovskiy Yu. M., Yakhno V. G., 1979. Autowave processes in distributed kinetic systems. *Uspekhi fizicheskikh nauk* 128(is. 4), 625—666 (in Russian).
- Gaponov-Grekhov A. V., Rabinovich M. I., 1987a. Non-linear dynamics of nonequilibrium media and turbulence. *Uspekhi fizicheskikh nauk* 152(is. 5), 159—162 (in Russian).
- Gaponov-Grekhov A. V., Rabinovich M. I., 1987b. Autostructures. Chaotic dynamics of ensembles. In: *Nonlinear waves. Structures and bifurcation*. Moscow: Nauka, P. 7—47 (in Russian).
- Ginzburg V. L., Tsytoich V. N., 1984. Transition radiation and transition scattering (some questions of the theory). Moscow: Nauka, 360 p. (in Russian).
- Guglielmi A. V., 2007. Ultralow frequency wave in the crust and in the Earth's magnetosphere. *Uspekhi fizicheskikh nauk* 177(12), 1257—1276 (in Russian).
- Guglielmi A. V., 2015. Foreshocks and aftershocks of strong earthquakes in the catastrophe theory. *Uspekhi fizicheskikh nauk* 185(4), 415—429 (in Russian).
- Gufeld I. L., 2013. Is the forecast of strong crustal earthquakes? *Vestnik RAN* 83(3), 236—245 (in Russian).
- Gufeld I. L., 2007. Seismic process. Physico-chemical aspects. Korolev: TsNIIMash Publ., 160 p. (in Russian).
- Gufeld I. L., Novoselov O. N., 2014. Seismic process in the subduction zone. Monitoring the background. Moscow: MSFU Publ., 100 p. (in Russian).
- Davydov V. A., Zykov V. S., Mikhaylov A. S., 1991. Kinematics of autowave structures in excitable media. *Uspekhi fizicheskikh nauk* 161(8), 45—86 (in Russian).
- Zakharov V. S., 2014. Self-similarity of structures and processes in the lithosphere as a result of a fractal and dynamic analysis: the Abstract of dissertations of the Dr. geol. and min. sci. Moscow, 35 p. (in Russian).
- Zelenyy L. M., Milovanov A. V., 2004. Fractal topology and strange kinetics: from percolation theory to problems in cosmic electrodynamics. *Uspekhi fizicheskikh nauk* 174(8), 810—851 (in Russian).
- Iudin D. I., 2005. Fractal dynamics of the active systems: the Abstract of dissertations of the Dr. phys. and math. sc. Nizhny Novgorod, 30 p. (in Russian).
- Kadomtsev B. B., 1994. Dynamics and information. *Uspekhi fizicheskikh nauk* 152(is. 5), 159—162 (in Russian).

- pehi fizicheskikh nauk 164(5), 449—530 (in Russian).
- Kerner B. S., Osipov V. V., 1989. Autosolitons. *Uspehi fizicheskikh nauk* 137(is. 2), 201—261 (in Russian).
- Klimontovich Yu., 2002. Introduction to the physics of open systems. Moscow: Yanus-K, 284 p. (in Russian).
- Koronovskiy N. Naimark A., 2012. The unpredictability of earthquakes as a fundamental consequence of the nonlinearity of geodynamic systems. *Vestnik Moskovskogo universitetata* (6), 3—11 (in Russian).
- Loskutov A. Yu., 2010. Fascination of chaos. *Uspehi fizicheskikh nauk* 180(2), 1305—1329 (in Russian).
- Makarov N. V., 2012. Capabilities of modern methods of geomechanical modeling as applied to the Earth science. Moscow: IPE RAS Publ., 14 p. (in Russian).
- Naimark O. B., 2008. Structural-scaling transitions and self-development patterns of earthquakes. *Fizicheskaya mezhmekhanika* 1(2), 89—106 (in Russian).
- Naimark A. A., Zakharov V. S., 2012. Ratios of direction, cyclicity and non-linearity in geological processes. *Vestnik KRAESC. Nauki o zemle* (1), 181—189 (in Russian).
- Panteleev I. A., Plekhov O. A., Naimark O. B., 2012. Nonlinear dynamics of structures exacerbation in ensembles of defects as a mechanism for the formation of foci of earthquakes. *Fizika Zemli* (6), 43—55 (in Russian).
- Rabinovich M. I., Myuezinolu M. K., 2010. Nonlinear dynamics of the brain: emotion and cognition. *Uspehi fizicheskikh nauk* 180(4), 371—387 (in Russian).
- Rodkin M. V., Pisarenko V. F., Ngo Thi Ly, Rukavishnikova T. A., 2014. On the feasibility of the law of distribution of rare strongest earthquakes. *Electronic Journal «Geodynamics and Tectonophysics»* 5(4), 893—904 (in Russian).
- Rumanov E. N., 2013. Critical phenomena far from equilibrium. *Uspehi fizicheskikh nauk* 183(1), 103—112 (in Russian).
- Samarskiy A. A. Elenin G. G., Zmitrenko N. V., Kurdyumov S. G., 1977. Combustion of a nonlinear medium in the form of complex structures. *Doklady AN SSSR* 237(6), 1330—1333 (in Russian).
- Surkov V. V., 2000. Electromagnetic effects during earthquakes and explosions. Moscow: Publ. House. MEPI, 235 p. (in Russian).
- Taranenko V. B., Sleksis S. P., Weiss K. O., 2008. Resonator spatial solitons. In the book.: dissipative solitons. Moscow: Fizmatlit, P. 109—200 (in Russian).
- Turuntaev S. B., Vorokhobina S. V., Melchaeva O. Yu., 2012. Detection of man-made changes in the seismic regime in using the methods of nonlinear dynamics. *Fizika Zemli* (3), 52—65 (in Russian).
- Fridman A. M., Polyachenko E. V., Nasyrkanov N. R., 2010. On some correlations in seismodynamics and two components of Earth's seismic activity. *Uspehi fizicheskikh nauk* 180(3), 303—312 (in Russian).
- Hayakawa M., Korovkin N. V., 2011. Seismoelectromagnetic phenomena as a new field of study radio wave phenomena: XII World Electrotechnical Congress. 4—5 October 2011 Presentations. (in Russian). <http://www.ruscable.ru/article/report/>
- Chebotaeva I. A., 2011. Structure and dynamics of seismic noise in geoenvironment fields. Methods and experimental results. The acoustics of inhomogeneous media. *Ezhegodnik RAO* (is. 12), 147—156 (in Russian).
- Shapoval A. B., 2011. Questions predictability in isotropic models with self-organized criticality: Abstract of the Dissertation Dr. geol.-min. sci. Moscow, 35 p. (in Russian).
- Shapoval A. B., Shnirman M. G., 2011. Universal algorithmic forecast extreme events time series. *Informatsionnye tehnologii i vychislitelnye sistemy* (4), 58—65 (in Russian).
- Shuman V. N., 2014a. Nonlinear dynamics of geomedium: transitional processes and critical phenomena. *Geofizicheskii zhurnal* 36(6), 129—142 (in Russian).
- Shuman V. N., 2015. Nonlinear dynamics, seismic activity and aerospace sounding systems. *Geofizicheskii zhurnal* 37(2), 38—55 (in Russian).
- Shuman V. N., 2014b. Seismic processes and advanced monitoring system. *Geofizicheskii zhurnal* 36(4), 50—64 (in Russian).
- Shuman V. N., 2012. Electrodynamics of fractal media, transitional fractal dispersion and electromagnetic noise of the lithosphere. *Geofizicheskii zhurnal* 34(1), 3—13 (in Russian).
- Shuman V. N., Kobolev V. P., Starostenko V. I., Burkinskiy I. B., Loyko N. P., Zakharov I. G., Yatsiuta D. A., 2012. A method of analysis of spontaneous electromagnetic emission of the Earth: physical backgrounds, elements of theory, field experiment. *Geofizicheskii zhurnal* 34(4), 40—61 (in Russian).
- Ebeling B., 1979. Education structures in irreversible processes. Introduction to the theory of dissipative structures. Moscow: Mir, 277 p. (in Russian).
- Aschwanden M. J., Crosby N. B., Dimitropoulou M., Georgoulis M. K., Hergarten S., McAteer J., Milovanov A. V., Mineshige S., Morales L., Nishizuka N., Pruessner G., Sanchez R., Sharma A. S., Strugarek A., Uritsky V., 2014. 25 Years of Self-Organized Criticality: Solar and Astrophysics. *Spase Sci. Rev.*, 1—120. doi 10. 1007/S. 11214-014-0054-6.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K., 1987. Self-Organized Criticality: an Explanations of 1/f Noise. *Phys. Rev. Lett.* 59, 381—384.
- Geller R. J., 1997. Earthquake production: A critical review. *Geophys. J. Int.* 131, 425—450.