

О концептуальных основах диагностики и мониторинга геосистем

© В. Н. Шуман, 2015

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 20 февраля 2015 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

Відповідно до ідей, методів і підходів нелінійної динаміки на якісному рівні розглянуто основні особливості геосистем. Підкреслено, що еволюція процесів і об'єктів у літосфері не може бути реалізована поза межами автохвильових процесів, які є просторово-часовими структурами. Суттєво, що загальні тенденції еволюції геосистем можуть бути інтерпретовані в термінах сейсмічного процесу. Мова йде про формування в геосистемі деякого узагальненого автохвильового поля, яке самоорганізується за рахунок потоків енергії та речовини із земних надр. Підкреслено актуальність досліджень синхронної динаміки підсистем або елементів геосередовища, впливу шумів на синхронізацію. В цьому контексті спостереження за спектром спонтанної сейсмоакустичної та електромагнітної емісії літосферного походження в часі та просторовими «біфуркаціями» автоструктур як відображенням еволюції сейсмотектонічних систем, яка породжує сейсмічний процес, виходить на передній план сучасних експериментальних досліджень. Дуже ймовірно, що такий підхід до визначення мети, завдань і способів моніторингу еволюції геосистем є не тільки необхідним, а й невідворотним, тому що дає змогу наблизити його реалізацію до експериментальної ситуації.

Ключові слова: геосистеми, автохвильові процеси, автоструктури, спонтанна емісія, моніторинг.

Введение. Как известно, определение тенденций развития геосистем и диагностика их динамических состояний — одна из актуальнейших задач современной геофизической науки. Все современные методы прогноза эволюции основаны на методах физического моделирования и мониторинге реальных процессов. Именно в этом контексте попытки динамического описания геосистем, традиции моделирования процессов на базе теории динамических систем, сами методы нелинейной динамики оказались востребованными для анализа данных геофизического эксперимента и мониторинга. К настоящему времени основные теоретические и методологические положения организации систем контроля и мониторинга литосферы достаточно известны и освещены во многих работах, опубликованных в последние годы (см., например, [Гуфельд, Новоселов, 2014; Гульельми, 2015] и цитируемую там литературу). Тем не менее круг проблемных вопросов, требующих дальнейших экспериментальных и теоретических исследований в этой области для реальных геосистем как совокупности компонентов литосферы, объединенных потоком энергии и вещества,

открытых, со сложной динамикой, остается весьма широким.

Весьма вероятно, что трудности понимания, объяснения и описания тенденций развития динамических состояний геосистем, их локального контроля и диагностики состоят, прежде всего, в онтологической сложности исследуемых систем и многофакторности действия на них физических полей различной природы. Как известно, соответствующие определения весьма сложны и, что существенно, не всегда однозначны. В некоторых случаях это эмпирика без должного теоретического обоснования. В итоге, что странно, во многих, даже вышедших в самое последнее время многочисленных публикациях, хотя и подчеркивается ключевая роль представлений нелинейной динамики при постановке и решении рассматриваемых вопросов, ее аппарат использовался весьма избирательно и фрагментарно. Стала отчетливо проявляться неадекватность существующих методов мониторинга реальной энергонасыщенной геосреды [Шуман, 2014а,б; 2015]. Задача мониторинга стала пониматься в качестве исследования отклика геосистемы на многочисленные (приливы и др.) и шумовые сигналы,

причем осуществлять его на иерархических уровнях организации геосистемы. Возникла необходимость отбора из огромного имеющегося материала мониторинговых наблюдений, и его приходится проводить с известной долей произвола, когда существенными критериями становятся интересы авторов. Характерный пример такого рода — краткосрочный прогноз сейсмичности, в частности, крупных сейсмических событий в реальной геосреде, который оказался значительно более сложной и неопределенной задачей, чем это предполагалось многими исследователями [Шаповал, 2011; Гуфельд, Новоселов, 2014].

Основная причина — весьма широкий комплекс нерешенных вопросов физики землетрясений [Гульельми, 2015]. Сама же нелинейная динамика лишила нас иллюзии глобальной предсказуемости.

В рассматриваемом контексте напомним ситуацию, возникшую в связи с появлением теории самоорганизованной критичности (СОК) — одну из новейших теорий нелинейных динамических систем [Бак, 2014]. Как известно, парадигма СОК — эволюции геосистемы к критическому состоянию без настройки каких-либо ее параметров — сразу привлекла к себе повышенное внимание геофизиков. Прогнозные свойства этой модели оказались в центре дискуссии о прогнозируемости сильных сейсмических событий, полагая, что процесс их подготовки порождается типичной системой с СОК [Шаповал, 2011; Шаповал, Шнирман, 2011].

Однако вопрос о существовании эффективного прогноза в системах с СОК остается весьма дискуссионным. С одной стороны, утверждается, что обширный класс сложных систем с СОК предсказуем с помощью некоторых универсальных предвестников [Шаповал, 2011], а с другой — «...понимание сейсмического процесса как фундаментального следствия эволюции сейсмотектонической системы к состоянию СОК, в котором невозможен реальный прогноз динамики и катастроф» [Захаров, 2014]. Не вникая в детали этой дискуссии, заметим лишь, что на данный момент эффективного критерия обнаружения СОК в реальной геосистеме все еще нет, а сама задача о прогнозируемости систем с СОК теоретически весьма сложна и исследуется эмпирически [Шаповал, 2011]. Очевидно, в связи с разнообразием нелинейных эффектов и процессов в неравновесных активных динамических системах в последние годы активно обсуждается

возможность создания неких объединяющих концепций, в частности, самоорганизации и диссипативных структур, синергетики, автоволн и автоструктур, теории катастроф.

Актуальная задача — исследование синхронной динамики сложных систем и изучение влияния шумов на синхронизацию, «конкуренции» между собой различными типами самосогласованного поведения их подсистем. Но поскольку интересы математиков, физиков и геофизиков не всегда канонизированы или параллельны, естественно, появляется желание прибегнуть и, по возможности, ограничиться менее изоцированной системой понятий и представлений, более адаптированных к реальному мониторинговому эксперименту. Таким образом, итог, в сущности, может быть сведен к координации и перегруппировке некоторого известного и, возможно, ограниченного набора теоретических результатов и экспериментальных фактов, не претендуя на большее. В то же время весьма проблематично даже упомянуть все многообразие исследований по этой теме. Напомним лишь, что реализация в геосреде того или иного сценария или механизма деформирования, а, как следствие, и способа релаксации напряжений, особенностей перехода разрушений в закритическую (катастрофическую) стадию (в режим с обострением, согласно терминологии нелинейной динамики) определяется в конечном счете уровнем и скоростью подводимой энергии и топологией дефектов на каждом пространственном масштабе. При этом присущая многим сейсмическим явлениям масштабная инвариантность очевидно связана с масштабно-инвариантными свойствами процессов разрушения, что, в принципе, дает дополнительные возможности их использования для прогноза сейсмичности [Зосимов, Лямшев, 1995].

Ввиду сложности проблемы сосредоточим далее внимание на ее частном аспекте, а именно: что нового дают идеи и подходы нелинейной динамики и изучение особенностей и механизмов формирования очагов разрушения в геосреде для теоретического обоснования и экспериментальной реализации мониторинговых наблюдений с целью диагностики сейсмотектонических систем. Что для этого необходимо и что, возможно, позволит продвинуться в исследованиях по прогнозу сейсмичности (в том числе краткосрочном), а также почему классические подходы оказались не готовыми к решению рассматриваемых многомасштабных задач. Как известно, классические подходы

оказались приемлемыми лишь для исследовательских целей, а при реализации функции контроля, предназначенного для оперативной реакции на критические геодинамические явления, оказались малоэффективными. По этой причине разработка некоего единого подхода, общего взгляда на эту проблему имеет несомненный методологический и прикладной аспект.

О мониторинге и диагностике состояний геосистем. Как известно, все современные методы прогноза эволюции реальных систем базируются на результатах физического моделирования и мониторинга реальных процессов. В последние годы отмечается появление работ, в которых анализируются особенности эволюционных процессов реальных объектов на основе численных решений уравнений метафизики, являющихся физически обоснованными моделями этих процессов [Макаров, 2012]. В частности, внимание концентрируется на особенностях и новых возможностях, которые дают идеи и подходы нелинейной динамики для решения прикладных задач.

Заметим также, что до настоящего времени методы прогноза эволюции геоструктур строятся, в основном, на анализе сейсмических каталогов. В этом контексте понятен повышенный интерес к СОК, связанный, очевидно, с ее универсальными свойствами (в определенных пределах). Стали ясны и эти пределы: стационарность модельной системы, демонстрирующей свойство СОК, имеет место на чрезвычайно длинных временных интервалах, соответствующих десятилетиям эволюции сейсмического процесса, а алгоритмы прогноза, основанные на адаптивных предвестниках, предсказывают порядка 80 % целевых событий, причем доля тревоги составляет около 25 % [Шаповал, 2011]. Весьма вероятно, это свидетельствует о том, что информация, содержащаяся в сейсмических каталогах, является неполной и недостаточной для реального успешного прогноза. В связи с этим высказана идея о необходимости перехода от анализа потоков событий (каталогов) к совместному анализу многомерных временных рядов, получаемых на большом числе пунктов наблюдения, покрывающих всю сейсмически опасную территорию [Любушин, 2011]. Стало предельно ясно, что предикторы сейсмических событий, обладающие определенной надежностью, вообще говоря, могут быть получены только из теоретических представлений о физике процессов. Но для этого необходимы

новые идеи и подходы как при развертывании мониторинговых сетей, комплексирования методов, так и при анализе их результатов [Шуман, 2014а, 2015].

Имеются весомые основания предполагать, что геосреда как самоорганизующаяся диссипативная система, оперирующая вдали от термодинамического равновесия, в зависимости от скорости, с которой поступает в нее энергия и вещество, может быть представлена в виде автоколебательной системы, в которой реализуются нелинейные пространственно-временные процессы. Оказалось, что пространственная локализация распределения параметров в ней ведет к локализации процесса во времени. Весьма существенно, что эволюция процессов и объектов в литосфере не может рассматриваться за рамками автоволновых процессов, являющихся пространственно-временными структурами. Особенность литосферы — фрактальность ее комплексов, когерентность поведения подсистем, адаптация их ансамблей к энергомассопотоку. Однако такие системы характеризуются не только термодинамическими параметрами, но и скоростью их изменения во времени и пространстве, определяющей эти потоки (процессы переноса) и термодинамические силы (градиент температуры, концентрации и др.). Типичными для таких иерархических неравновесных систем являются высококоррелированное поведение их подсистем и возникновение длинных причинно-следственных связей. Примечательно, что рассматриваемые пространственно-временные структуры со своей временной динамикой в определенных рамках не зависят от начальных и краевых условий, носят в определенном смысле универсальный характер и подлежат экспериментальной диагностике. Это пространственно-временные структуры активности, в том числе хаотические, представляющие собой импульсы и фронты возбуждения, неустойчивость и взаимодействие которых приводит к установлению в системе самоподдерживающихся колебаний с определенной пространственной конфигурацией. Природа эмиссии — трансформация собственной энергии геосреды в различные локально неустойчивые состояния, которые, собственно говоря, и становятся источниками излучений различной физической природы. Сейсмическая, сейсмоакустическая и электромагнитная эмиссия литосферы — результат активных процессов, возникающих в результате изменений в организации геосреды и характере связей между

ее различными подсистемами. При этом спонтанное эмиссионное излучение, в отличие от вынужденного, не зависит от внешних воздействий и определяется только свойствами самой геосистемы. Можно предположить, что и сейсмическое, и сейсмоакустическое, и электромагнитное излучение — это динамический отклик геосреды на пронизывающий ее тепловой поток и восходящий поток легких газов из низов литосферы.

Существенно, что данное непрерывное излучение, регистрируемое в геосреде в чрезвычайно широком частотном диапазоне, свидетельствует об исключительно высокой энергонасыщенности литосферы, а фрактальная структура сигналов дает основание искать механизмы его генерации как некоторого критического неравновесного процесса. Здесь необходимо, разумеется, учитывать возможность различного физического содержания процессов генерации на разных масштабных уровнях геометрически самоподобной блоковой системы геосреды, причем каждый из ее элементов генерирует последовательность импульсов с различным интервалом следования и пространственной конфигурацией со стоячими волнами.

Весьма вероятно, что этот спонтанный сейсмоакустический и электромагнитный шум литосферного происхождения может быть истолкован в терминах автоколебаний, сама же структура спектра колебаний определяется масштабами, ограничивающими диапазон проявления фрактальных свойств, и значением спектральной размерности [Кадо́мцев, 1994; Зосимов, Лямшев, 1995].

Активность и нелинейность геосреды порождает интенсивное взаимодействие эмиссионных и внешних полей, причем и сейсмичность, и сейсмоакустическая, и электромагнитная эмиссии являются проявлением метастабильного состояния вещества земных недр и обладают высокой чувствительностью к внешним воздействиям. При этом флуктуационно-диссипативная теорема, согласно которой механизм любой диссипации является одновременно и механизмом рождения флуктуаций, связывает флуктуации геосистемы с ее диссипативными свойствами [Кадо́мцев, 1994].

Как известно, с изменением интенсивности потока энергии и вещества из низов литосферы в рассматриваемой геосистеме происходит качественная перестройка имеющихся диссипативных или автоволновых структур. В итоге эмиссионное сейсмоакустическое и электромагнитное излучение отражает собственную

эволюцию геосреды, а его спектр — стадию этой эволюции и зависит от параметров ее структуры.

Таким образом, в геосистеме в целом формируется некоторое обобщенное автоволновое поле, самоорганизующееся за счет энергетических потоков из земных недр и элементарных энергетических полей ее отдельных подсистем и блоков, тесно связанное со строением и динамикой геосреды и, в частности, с топологией ее межблочной структуры. С этой точки зрения слежение за спектром эмиссий в системе во времени и бифуркациям автоструктур в пространстве приобретают особую значимость, так как позволяют приблизить и конкретизировать постановку задачи и реализацию геофизического мониторинга к экспериментальной ситуации. В этом контексте исследование спонтанной эмиссии имеет самостоятельное значение как с точки зрения изучения закономерностей и механизмов ее генерации, так и получения информации о свойствах геосреды, условиях ее деформирования и энергообмена, прогноза эволюции [Шуман, 2012, 2014а,б, 2015]. Заметим также, что сам спонтанный шум в геосистеме, как и шумы внешней природы, выступает в роли конструктивного фактора, вызывающего рост степени когерентности или степени порядка в ней. В этом контексте обратим внимание на эффект стохастического резонанса, определяющего группу явлений, при которой отклик нелинейной динамической системы на слабое внешнее воздействие заметно усиливается с ростом интенсивности шумов в системе [Анищенко и др., 2010].

Самоорганизованная критичность и сейсмический процесс. Как известно, термин СОК стал частью физического лексикона и привлек к себе повышенное внимание сейсмологов сразу после разработки Баком, Тангом и Визенфельдом ее первой модели, демонстрирующей это свойство — «куче песка», конус которой при подсыпке формируется в результате сброса избыточной массы в лавины [Bak et al., 1987]. Многие полагают, что СОК — первая общая теория сложных систем, базирующаяся на относительно развитой математической модели. Ее суть состоит в том, что по мере эволюции нелинейной динамической системы она неизбежно приближается к критической точке (точке бифуркации). Наличие СОК означает стремление системы к метастабильному квазиравновесному состоянию, включая и переход к такому состоянию через катастрофы различных масштабов.

Очевидно, интерес к СОК связан не только с ее универсальностью и прогнозными свойствами (в некоторых пределах), но, вероятно, и с необходимостью понять наиболее общие черты и закономерности в поведении сложных нелинейных динамических систем, обнаруживающих самосогласованное стремление к критическим режимам. Как известно, «предпочтение», отдаваемое системой критическим режимам, обусловлено, по-видимому, их относительно термодинамической выгодностью: свободная энергия ее ансамблей подсистем понижается при формировании пороговых образований. В то же время, как отмечает П. Бак, в модели СОК в своем большинстве «...имеют дело с абстрактными сущностями и их построение и исследование может трактоваться скорее как создание языка, нежели как описание реальных систем» [Бак, 2014]. Здесь доминирует парадигма прогнозируемости, основанная на принципе СОК: предполагается, что сейсмо-тектонические процессы могут быть отнесены к классу систем с СОК. Однако на данный момент эффективного критерия обнаружения СОК в системе нет. Обычно переход системы к СОК сопровождается появлением характерного «розового» шума (или фликкер-шума) на низких частотах $\sim f^{-1}$. Спектр такого шума примечателен тем, что его спектральная плотность (энергия, которая приходится на один герц частоты) с падением частоты ведет себя обратно пропорционально некоторой экспоненте с показателем, близким к единице. При этом концепция СОК представляет розовый $1/f$ шум следствием достижения сложной системой критического состояния, к которому эта система склонна приходить. П. Бак по этому поводу отмечает: «...мы пришли к выводу, что шум $1/f$ должен быть кооперативным феноменом, когда различные элементы большой системы действуют вместе каким-то согласованным образом» [Бак, 2014]. Особенность систем с розовыми $1/f$ шумом состоит в том, что значительная часть энергии флуктуаций в системе связана с очень медленными процессами и означает возможность катастрофических выбросов в ней. Но всегда ли розовый шум в системе является достаточно «розовым»? Ведь вопреки предложениям П. Бака, его модель СОК демонстрирует критичность к начальным условиям. Возможно, по этой причине среди некоторых профессионалов отмечается несколько неоднозначное, даже настороженное отношение к ней: несмотря на известный прогресс в исследовании СОК, многие ее актуаль-

ные проблемы все еще остаются нерешенными. Переход к неравновесному стационарному состоянию является весьма сложным процессом взаимодействия между механизмами самоорганизации, определяющими ход эволюционных процессов, и эффектами динамической релаксации, отражающими роль диссипативных факторов в геосреде. Согласно [Зеленый, Милованов, 2004], явление СОК как сингулярного неравновесного состояния в более расширенной трактовке можно понять в контексте фундаментальных физических принципов, в частности принципа наименьшего действия. Для достижения системой такого состояния воздействия на нее должны быть как можно медленными. Именно в этом случае стремление системы к состоянию СОК становится универсальным явлением, не зависящим от специфики системы. Тем самым устанавливается соответствие СОК «...фундаментальным физическим принципам, лежащим в основе современной теории динамических систем» (разумеется, при соответствующих ограничениях по частоте; с увеличением частоты шумы в системе, как правило, темнеют) [Зеленый, Милованов, 2004].

Не удивительно, что прогнозные свойства геосистем с СОК оказались в центре дискуссий о прогнозируемости сейсмичности. Некоторые исследователи до сих пор продолжают утверждать о невозможности прогноза систем с СОК, если основываться на законе Гуттенберга—Рихтера, причем его (прогноза) ограниченность заложена в самой природе геосистем [Захаров, 2014]. Однако, несомненно, существуют некоторые наиболее общие закономерности в поведении сложных нелинейных динамических систем, обнаруживающих самосогласованное стремление к критическим режимам. В частности, эмпирический анализ указывает на возможность весьма эффективного в определенном смысле прогноза в системах с СОК, а представления о самоорганизации сейсмического процесса согласуются с предсказуемостью наиболее сильных событий [Шаповал, 2011]. Однако эффективность такого прогноза в реальном времени зависит от локальной нестационарности процесса и является неоднородной, причем стационарность такой модельной системы имеет место лишь на чрезвычайно длинных временных интервалах, что вполне согласуется с требованием медленности изменений внешних воздействий на геосистему. Но, во-первых, требование медленности изменений в геосистемах не всегда выполняется,

и сколько бы мы ни накапливали информацию об их поведении, всегда найдутся некоторые неучтенные или неизвестные процессы, которые будут сказываться на временах, соизмеримых со временем изучения системы. Во-вторых, реализация в геосреде того или иного способа релаксации накопленных напряжений и, как следствие, формирование очага сейсмического события определяются как уровнем и скоростью изменений пронизывающих систему потоков энергии и вещества, так и топологией дефектов на каждом пространственном масштабе геосреды. Можно предположить, что изучение последствий влияния этих факторов потребует разработки новых моделей, методов и, что не менее актуально, адекватных образов и понятий, единых для неравновесных систем более общего типа, которые, возможно, могут иметь решающее значение для постановки будущих работ. В частности, интерпретируя сейсмичность как результат устойчивой переходной активности геосреды с конечной плотностью энергетических потоков, имеются веские основания предположить, что ее описание окажется эффективным на уровне переходных мод и метастабильных состояний, обусловленных и связанных с взаимодействием ее подсистем, их синхронизацией и подавлением одних колебательных мод другими. Становятся особенно актуальными исследования синхронной динамики подсистем или элементов геосреды, влияния шумов на синхронизацию, особенностей превращения одних пространственно-временных структур в другие при изменении параметров геосистемы, «бифуркаций» их пространственных образов.

Геосреда и автоволновые процессы. Как уже отмечалось, полученные в последние годы результаты обширных теоретических и экспериментальных исследований дают веские основания для физического рассмотрения литосферы Земли как пространственно-структурированной существенно многомасштабной открытой энергонасыщенной геосистемы с нелинейной динамикой. Как известно, нелинейная динамика значительно расширила в это время свои рамки. Ее основная задача — поиск закономерностей, по которым функционируют ее отдельные составляющие или подсистемы, и взаимодействуют между собой, порождая коллективное, согласованное поведение, т. е. как эти подсистемы эволюционируют и самоорганизуются. Показано, что в ансамблях взаимодействующих элементов различной природы можно выделить два взаи-

моисключающих друг друга процесса: а) синхронизацию, в результате которой вырабатывается приемлемый для взаимодействующих элементов и подсистем общий ритм активности и б) конкуренции, когда происходит подавление активности одного или группы элементов другим, более энергетически мощным в данный момент элементом или ансамблем. Стало очевидным, что проблема сейсмичности тесно связана с решением ключевых проблем в физике и механике разрушения, причем любой прогноз разрушения в принципе невозможен без учета его многомасштабной иерархической природы [Панин и др., 2012].

Одна из причин интереса к этому кругу проблем связана с попытками поиска новых экспериментальных возможностей диагностики геосистем и их динамических состояний. Ясно, что для их решения и корректной постановки проблем прогноза разрушения необходимы новые идеи и подходы, которые и были сформулированы в рамках нелинейной динамики и механики, физической мезомеханики и неравновесной термодинамики. Весьма важно, что при термодинамическом подходе не имеет принципиального значения природа источника напряжений в земной коре. Само же формирование возможного очага разрушения связывается с процессами, снижающими скорость диссипации энергии, а следовательно, и скорость роста энтропии в системе. Это — процесс, удовлетворяющий в некоторой области открытой неравновесной системы принципу минимального производства энтропии. При этом процесс самоорганизации функционирует на принципе минимального производства энтропии (вдали от равновесия), а рождение локальных состояний с низкой энтропией в конечном итоге ведет к ускорению общего роста энтропии всей системы.

Заметим, что возникновение диссипативных структур носит пороговый характер, который неравновесная термодинамика связывает с неустойчивостью: новая структура всегда является результатом неустойчивости и возникает из флуктуаций [Кадомцев, 1994].

Диссипативные структуры — это упорядоченные и самоорганизованные образования в системах, далеких от равновесия, обладающие определенной формой и характерными размерами, устойчивые относительно малых возмущений. Для своего существования они требуют постоянного притока энергии (энергетической подпитки). Важнейшие их характеристики — время жизни, область локализации и фракталь-

ная размерность (как известно, диссипативные твердотельные структуры, самоорганизующиеся в открытых системах, являются фрактальными). Их характерные признаки — самоподобие, масштабная инвариантность, структурная иерархия. При этом автоволновые процессы являются одним из важнейших факторов самоорганизации в термодинамически открытых неравновесных системах. Существенно, что сами сейсмические события, а также их форшоки и афтершоки связываются с трансформацией автоволновых структур в диссипативные структуры обострения.

Следует упомянуть, что под автоколебательной системой обычно понимают систему, в которой происходит преобразование энергии квазипостоянного (неколеблющегося) источника энергии в энергию колебаний (осциляторных, близких к гармоническим, и релаксационных или разрывных). Именно эти релаксационные автоколебания с частичным сбросом энергии в виде сейсмоакустических и электромагнитных возмущений изменяют фон регистрируемых естественных полей. Эти эмиссии также обладают ярко выраженными свойствами нелинейных процессов, способностью к периодической самоорганизации и хаотизации, характерному поведению в периоды приближения к точке бифуркации и выходе из нее. По этой причине в последние годы сейсмоакустическому и электромагнитному шуму придается большое значение как с точки зрения изучения механизмов его генерации и механизмов распространения, так и получения информации о свойствах геосреды, условий ее деформирования и тенденции развития. С этой точки зрения электромагнито- и акустосейсмогеодинамика рассматривает природу сейсмичности как результат развития земной коры и всей литосферы с учетом их глубинного строения, иерархически-блочной структуры, напряженно-деформированного состояния и процессов разрушения последовательности катастроф нарастающих масштабов. При этом индикаторами такого крупномасштабного катастрофического события в земной коре, согласно работе [Макаров, 2011], могут служить:

- замирание деформационной активности в ближайшей окрестности формирующегося магистрального разрыва;
- генерация в этой зоне формирующегося очага разрушения цугов деформационных фронтов и их концентрации в местах формирующегося разрыва.

И все же широкий комплекс вопросов фи-

зики сейсмического процесса остается нерешенным [Гуфельд, Новоселов, 2014]. Очевидно, наиболее трудными из них являются вопросы глубокофокусных землетрясений, очаги которых формируются в мантии, причем даже умеренные оптимистические ожидания в их решении в ближайшей перспективе все еще явно опережают реальный прогресс в этой области исследований. В частности, пока не нашли решения важные вопросы формирования автоколебаний, автоволн и автоструктур в неравновесной диссипативной геосреде, не известны с достаточной полнотой механизмы их пространственной локализации, бифуркации их пространственных образов, актуальные с точки зрения развития мониторинговых наблюдений. Однако рассмотренные идеи и полученные на их основе качественные результаты являются определяющими для понимания физики процесса разрушения и могут служить концептуальной основой постановки мониторинговых наблюдений.

Мониторинг и прогноз как проблема физики. Так как для большинства сложных динамических систем, с которыми обычно имеют дело в естественных дисциплинах, вывести какие-либо уравнения непосредственно из общих физических принципов, как правило, не удается, их изучение, особенно при экспериментальных исследованиях, «... часто реализуется посредством обработки сигналов, произведенных системой» [Лоскутов, 2010]. Очевидно, наличие только временных рядов (последовательности значений некоторых переменных, которые могут быть зарегистрированы экспериментально в непрерывном или дискретном режиме через некоторые промежутки времени) при отсутствии соответствующих уравнений сильно ограничивает возможности изучения системы и прогноза ее динамики. Однако видна и привлекательность такого подхода: в этом случае нет необходимости в построении соответствующей модели, описывающей динамику исследуемых рядов [Лоскутов, 2010]. Требуется лишь достаточная «длина» временного ряда и малость шумовой составляющей. Разработан ряд методов прогноза, имеющих целью по измеренным значениям временного ряда предсказать будущие значения этих характеристик, в которых на основе статистического анализа предлагалось использовать авторегрессию, скользящее среднее и др. Но с развитием нелинейной динамики стало ясно, что задача прогноза значительно более сложна и выходит за рамки этих простых схем. Позднее, уже с уче-

том нелинейной динамики, появились новые практические методы и построен ряд алгоритмов такого прогноза, в частности, на основе моделей «куча песка» (СОК). При этом предсказуемость рассматривалась как универсальное свойство временных рядов произвольной природы — сейсмических каталогов, финансовых индексов на биржах и др. [Шаповал, 2011; Шаповал, Шнирман, 2011]. Предполагалось также, что все эти системы прогнозируемы благодаря их колебаниям вокруг критической точки, причем один и тот же алгоритм может быть применен к прогнозу экстремальных событий временных рядов весьма различной природы — сильных сейсмических событий, крахов на биржевых рынках, наступления рецессий и др. [Шаповал, 2011]. Тем не менее, хотя эффективный прогноз сильных сейсмических событий и не противоречит СОК [Шаповал, 2011], их краткосрочный прогноз оказался более сложной задачей, чем это вытекает из этих моделей [Гуфельд, Новоселов, 2014].

Что же нового привнесли идеи и подходы нелинейной динамики и физической мезомеханики для изучения особенностей и механизмов формирования очагов разрушения в литосфере, решения практических задач мониторинга и прогноза сейсмичности, прежде всего краткосрочного? Как известно, именно этот прогноз представляет наиболее трудную проблему, в отношении которой все еще не существует установившейся точки зрения. В частности, как отмечают и Гуфельд, и Новоселов, «...не исключено, что точный краткосрочный прогноз вообще недостижим» [Гуфельд, Новоселов, 2014]. Но, как уже отмечалось, можно выдвинуть и контраргументы. Пессимизм здесь, очевидно, обусловлен сложностью и нетрадиционностью задач современной теории нелинейных неравновесных сред, возможно связанный с явлениями структурообразования и их динамикой. Как известно, особый класс неравновесных сред представляют так называемые возбудимые среды, которые имеют некоторый конечный порог неустойчивости: для процессов структурообразования в подобных средах типично «саморазвитие» структур в пространстве, сосуществование локализованных возбуждений, мультистабильность, развитие пространственно неупорядоченных структур («пространственной» турбулентности) [Гапонов-Грехов, Рабинович, 1987]. В этом контексте сейсмические события в некотором смысле ассоциируются с возбуждением в геосреде автоструктур большой амплитуды за счет

внешнего энергопотока при определенном уровне шумов в геосистеме, а основные проблемы диагностики и мониторинга, вероятно, связаны с бифуркациями в пространственных ансамблях геоструктур. Следовательно, понимание сейсмического процесса как фундаментального следствия эволюции системы к состоянию СОК, как это обычно предполагается в большинстве работ этого цикла [Шаповал, 2011; Шаповал, Шнирман, 2011], оказывается весьма стесненным жесткими рамками систем с аномально медленной динамикой.

В итоге попытки исследования задачи о прогнозируемости систем с СОК исключительно эмпирически весьма проблематичны. В столь сложной ситуации на передний план в современных мониторинговых системах выходят задачи слежения за спектром шумов в геосистеме и бифуркациями автоструктур. В первую очередь, это слежение за сменой топологии автоструктур, их пространственного саморазвития, а также процессами нарастания низкочастотных (мягких мод) в спектре ее шумов, который, разумеется, у каждой системы свой [Руманов, 2013]. Становится актуальной задача мониторинга восприимчивости системы (или обобщенной восприимчивости как характеристики отклика геосистемы на внешние воздействия). Исследования в приближении среднего поля в этой ситуации становятся неэффективными.

Заметим, что здесь мы сталкиваемся с весьма нетривиальной проблемой: как отличить фликкер-шум в системе от низкочастотного максимума шумов на нижних частотах, связанного с ростом восприимчивости системы в этом диапазоне частот. Весьма существенно, что этот максимум, в отличие от фликкер-шума, исчезает при удалении параметров системы от точки бифуркации [Руманов, 2013]. При этом спонтанные эмиссии литосферного происхождения (и сейсмоакустическая, и электромагнитная), являющиеся отражением собственной эволюции геосреды, спектр которых отражает стадию этой эволюции, обладающие ярко выраженной способностью к периодической самоорганизации и хаотизации, характерному поведению при приближении к точке бифуркации и выходе геосистемы из нее, неизбежно оказываются в центре внимания современных мониторинговых систем.

Несомненно, проблема синтеза геоэлектромагнетизма и нелинейной динамики, сейсмоэлектромагнитных явлений как отражения механизмов пространственно-временной ло-

кализации и формирования автоструктур — относительно новая и перспективная область геофизических, в том числе мониторинговых исследований. Но именно в этом контексте становится особенно заметной неадекватность существующих методов мониторинговых систем и выбора физически обоснованных параметров слежения. При этом сейсмоэлектромагнитные явления служат чувствительным индикатором процессов формирования очагов землетрясений и процессов разрушения в литосфере. Именно по этой причине, как уже отмечалось, сейсмоэлектромагнитному шуму как пространственно-временному феномену в последнее время придается самостоятельное значение не только с точки зрения механизмов его генерации и распространения, но, прежде всего, с точки зрения получения информации о геосреде, условиях деформирования и эволюции. Необходимость расширения экспериментальных исследований при таком подходе также очевидна.

Заключительные замечания. Подводя итог проведенному анализу, можно заключить, что быстрое развитие во второй половине XX века теории сложных динамических систем, к которым могут быть отнесены и геосистемы, изучение особенностей и механизмов формирования очагов разрушения в земной коре в русле идей, подходов и методов нелинейной динамики и физической мезомеханики привели к значительному прогрессу в описании процессов формирования очагов землетрясений, вопросов прогнозируемости и прогноза эволюции конкретных геосистем. В частности, исследованы теоретические аспекты прогнозируемости в математических моделях с СОК, демонстрирующих основные, грубые свойства сейсмического процесса. Получены весомые свидетельства того, что предшествующие сильным сейсмическим событиям явления (предвестники) существуют. На их основе построены алгоритмы среднесрочного прогноза, достаточно эффективно предсказывающего их наступление в реальном времени [Шаповал, 2011]. Установлено, что эволюция процессов и объектов в литосфере не может реализовываться вне рамок автоволновых процессов, являющихся пространственно-временными структурами. Получены весомые основания того, что реальная геосреда может быть представлена в виде автоколебательной системы, в которой реализуются нелинейные процессы как в пространстве, так и во времени. При этом в неравновесных средах, как правило, формируются не уединенные автоструктуры, а ансамбли

таких структур.

Существенно, что, несмотря на широкое разнообразие контекстов, в которых реализуется динамика геосистем, существуют общие фундаментальные закономерности поведения, независимые от взаимодействий их локальных элементов и подсистем. Примечательно, что общие тенденции их развития и эволюции могут интерпретироваться в терминах сейсмического процесса, а проявляющаяся во временных рядах мониторинговых наблюдений динамика имеет общие черты с реальностью.

Тем не менее ключевые вопросы, относящиеся к формированию очагов сейсмических событий, особенно глубинных, их энергетики, миграции, генерации краткосрочных предвестников и краткосрочного прогноза, все еще остаются открытыми и выглядят в ряде случаев весьма пессимистично или имеют мрачноватые оттенки. Остаются весьма актуальными исследования по формированию высокоорганизованных пространственно-временных структур в неравновесной, неоднородной геосреде — автоволн и автоструктур, их пространственно-временной локализации и бифуркации их пространственных образов, особенностей отклика геосистем на многочастотные и шумовые воздействия различной интенсивности. Весьма примечательно, что отклик реальных геосистем на эти воздействия оказывается различным в зависимости от условий их самовозбуждения, обусловленного особенностями пронизывающего их энергопотока и нетривиальным характером динамики в зависимости от размеров системы.

В рассматриваемом контексте наиболее важным из того, что было изложено выше, есть формирование в геосистеме некоторого обобщенного автоволнового поля, самоорганизующегося за счет энергомассопотока из низов литосферы (земных недр). При этом слежение за спектром спонтанных эмиссий (сейсмической, сейсмоакустической и электромагнитной) во времени и пространственных «бифуркаций» автоструктур, являющихся отражением эволюции сейсмотектонических систем, порождающих сейсмический процесс, а также координированных с ними измерений сейсмоатмосферных и сейсмоионосферных возмущений, выходит на передний план экспериментальных исследований в ближайшей перспективе. Весьма вероятно, что такой подход к определению целей, задач и способов мониторинга геосистем с целью краткосрочного прогноза сильных сейсмических событий является не только необходимым, но и неизбежным.

Список литературы

- Анищенко В. С., Вадивасова Т. Е., Стрелкова Г. И. Автоколебания динамических и стохастических систем и их математический образ — аттрактор. *Нелинейная динамика*. 2010. Т. 6. № 1. С. 107—126.
- Бак П. Как работает природа. Москва: Книжный дом «Либроком», 2014. 276 с.
- Гапонов-Грехов А. В., Рабинович М. И. Нелинейная динамика неравномерных сред: структуры и турбулентность. *Успехи физ. наук*. 1987. Т. 152. Вып. 5. С. 159—162.
- 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., Новоселов О. Н. Сейсмический процесс в зоне субдукции. Мониторинг фонового режима. Москва: Изд. МГУЛ, 2014. 100 с.
- 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.
- Зосимов В. В., Лямшев Л. М. Фракталы в волновых процессах. *Успехи физ. наук*. 1995. Т. 165. № 4. С. 361—401.
- Кагомцев Б. Б. Динамика и информация. *Успехи физ. наук*. 1994. Т. 164. № 5. С. 449—530.
- Лоскутов А. Ю. Очарование хаоса. *Успехи физ. наук*. 2010. Т. 180. № 2. С. 1305—1329.
- Любушин А. А. Прогноз Великого Японского землетрясения и сингулярности сейсмического шума. http://www.seismicweather.com/download/Russian_nature_journal.pdf. 2011.
- Макаров Н. В. Возможности современных методов геомеханического моделирования в приложении к задачам наук о Земле. Москва: Изд. МФЗ РАН, 2012. 14 с.
- 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.
- Руманов Э. Н. Критические явления вдали от равновесия. *Успехи физ. наук*. 2013. Т. 183. № 1. С. 103—112.
- 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. Электромагнитная эмиссия литосферы: всегда ли мы адекватно трактуем то, о чем как будто знаем? *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 2. С. 4—19.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K., 1987. Self-Organized Criticality: an Explanations of 1/f Noise. *Phys. Rev. Lett.* 59, 381—384.

On conceptual grounds of diagnostics and monitoring of geosystems

© V. N. Shuman, 2015

Within the trend of ideas, methods and approaches of nonlinear dynamics basic features of geo-systems are being considered on high-quality level. It is noticed that evolution of processes and objects in lithosphere cannot be realized outside the limits of self-wave processes, which are spatial-temporal structures. It is remarkable that general trends of evolution of geo-systems can be interpreted in terms of geo-seismicity. We mean formation in geo-system of some generalized self-wave field, which is self-organized at the expense of energy and matter flows from the depth of

the earth. Urgency of studies of synchronous dynamics of subsystems or elements of geo-medium, influence of noise on synchronization is being noticed. It is noteworthy that in this context tracking the spectrum of spontaneous seismic-acoustic and electromagnetic emission of lithosphere origin temporally and of spatial «bifurcations» of auto-structures which reflect evolution of seismic-tectonic systems producing seismic process become the first-rate task of modern experimental studies. It is probable that such an approach to formulation of aims, objects and ways of monitoring of evolution of geo-systems is not only necessary but inevitable because it allows to bring it nearer to experimental situation.

Key words: geosystems, autowave processes autostructures spontaneous emission monitoring.

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).
- Buck P., 2014. How does nature. Moscow: Book House «Librokom», 276 p. (in Russian).
- Gaponov-Grekhov A. V., Rabinovich M. I., 1987. Nonlinear dynamics of nonequilibrium media and turbulence. *Uspehi fizicheskikh nauk* 152(is. 5), 159—162 (in Russian).
- Guglielmi A. V., 2015. Foreshocks and aftershocks of strong earthquakes in the catastrophe theory. *Uspehi fizicheskikh nauk* 185(4), 415—429 (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).
- Zakharov V. S., 2014. Self-similarity of structures and processes in the lithosphere by the results of the fractal and dynamic analysis: Abstract Dis. Dr. geol.-min. sci. Moscow, 35 p. (in Russian).
- Zeleny L. M., Milovanov A. V., 2004. Fractal topology and strange kinetics: from percolation theory to problems in cosmic electrodynamics. *Uspehi fizicheskikh nauk* 174(8), 810—851 (in Russian).
- Zosimov V. V., Lyamshev L. M., 1995. Fractals in wave processes. *Uspehi fizicheskikh nauk* 165(4), 361—401 (in Russian).
- Kadomtsev B. B., 1994. Dynamics and information. *Uspehi fizicheskikh nauk* 164(5), 449—530. (in Russian).
- Loskutov A. Yu., 2010. Fascination of chaos. *Uspehi fizicheskikh nauk* 180(2), 1305—1329 (in Russian).
- Lyubushin A. A., 2013. Forecast Great Japan Earthquake and singularity of seismic noise. http://www.seismic-weather.com/download/Russian_nature_journal.pdf. 2011. (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).
- Panin V. E., Egorushkin V. E., Panin A. V., 2012. Non-linear wave processes in a deformable solid as in a multiscale hierarchically organized system. *Uspehi fizicheskikh nauk* 182(12), 1351—1357 (in Russian).
- Rumanov E. N., 2013. Critical phenomena far from equilibrium. *Uspehi fizicheskikh nauk* 183(1), 103—112 (in Russian).
- Shapoval A. B., 2011. Questions predictability in isotropic models with self-organized criticality: Abstract Dis. Dr. geol.-min. sci. Moscow, 35 p. (in Russian).
- Shapoval A. B., Shnirman M. G., 2011. Universal algorithmic forecast extreme events time series. *Informatsionnyie tehnologii i vychislitelnyie sistemy* (4), 58—65 (in Russian).
- Shuman V. N., 2014a. Nonlinear dynamics of geomedium: transitional processes and critical phenomena. *Geofizicheskiy zhurnal* 36(6), 129—142 (in Russian).
- Shuman V. N., 2015. Nonlinear dynamics, seismic sounding and aerospace systems. *Geofizicheskiy zhurnal* 37(2), 38—55 (in Russian).
- Shuman V. N., 2014b. Seismic processes and advanced monitoring system. *Geofizicheskiy zhurnal* 36(4), 50—64 (in Russian).
- Shuman V. N., 2012. Electromagnetic emission of lithosphere: Do we adequately interpret what seemed to know? *Geofizicheskiy zhurnal* 34(2), 4—19 (in Russian).
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K., 1987. Self-Organized Criticality: an Explanations of 1/f Noise. *Phys. Rev. Lett.* 59, 381—384.