

Нелинейная динамика геосреды: переходные процессы и критические явления

© В. Н. Шуман, 2014

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина
Поступила 2 сентября 2014 г.

Представлено членом регколлегии В. И. Старостенко

В рамках ставших вже класичними поглядів на геосередовище як на відкриту нелінійну активну ієрархічно-неоднорідну динамічну систему зроблено спробу аналізу процесів у геосистемах. Зазначено, що спонтанний сейсмоакустичний і електромагнітний шум літосферного походження — це універсальний ефект, зумовлений наявністю дифузії. Важливо, що спонтанний шум можна тлумачити в термінах автоколивань, характеристики яких визначаються параметрами геосередовища. Розглянуто питання синергетики геосистем, роль хаосу, зокрема слабкого, в їх поведінці. Проаналізовано перехідну динаміку геосистем і критерії близькості біфуркації стаціонарного режиму. Підкреслено фундаментальну властивість геосистем — наявність стадії підготовки сейсмічних явищ, що свідчить про реальність їх прогнозу. Однак його реалізація потребує постановки адекватних моніторингових систем спостережень і методів їх обробки, до чого геофізики поки що не готові. Зазначено, що успіх у розв'язанні проблеми прогнозу сейсмічності тісно пов'язаний з результатами масштабних науково-технічних проєктів, а не питань, які зазвичай намагаються вирішувати у межах старих ідей.

Ключові слова: нелінійна геодинаміка, перехідні процеси, сейсмічність, електромагнітна емісія, метастабільність, стійки переходи.

Введение. В настоящее время нелинейная динамика как математическая теория эволюции динамических систем в значительной степени расширила свои рамки и описательные возможности, в том числе и в многочисленных приложениях к задачам наук о Земле. В частности, в рамках сформировавшихся взглядов на геосреду как открытую иерархическую неоднородную нелинейную динамическую систему идеи и методы нелинейной динамики послужили основой для постановки и решения ряда актуальных вопросов физики, особенностей и механизмов формирования очагов разрушения в земной коре, прогноза и прогнозируемости сейсмического процесса, генерации спонтанного сейсмоакустического и электромагнитного шума, получения информации о свойствах геосреды, особенностях строения и условиях ее деформирования.

Разумеется, центральной проблемой в рассматриваемом контексте является проблема изучения закономерностей формирования очагов разрушения в земной коре с целью прогноза координат и времени катастрофических событий (землетрясений). При этом сама эволюционная природа и свойства режимов

геосистем стимулируют привлечение методов нелинейной динамики.

Получила существенное развитие и сама нелинейная динамика. Центр ее интересов сместился в область исследования сложных динамических систем.

Новая парадигма нелинейной динамики — теория самоорганизованной критичности (СОК) — привела к переоценке взглядов на динамику иерархических систем (см., например, [Макаров, 2012]).

Как известно, свойством самоорганизованной критичности обладают только многомасштабные иерархически структурированные системы, к которым относится и геосреда — открытая диссипативная динамическая система, способная к самоорганизации. При этом ключом к пониманию сути сложных явлений и процессов является диссипативность и нелинейность динамической системы.

Характерные особенности решений уравнений нелинейной динамики — аттракторы, хаотическое поведение, бифуркации, самоорганизованная критичность, наличие медленной динамики, режимов с обострением и др. [Макаров, 2012].

Построена теория бифуркаций многомерных динамических систем, достаточно полно изучена теория перехода от детерминированного поведения к хаотическому, проведено исследование нелинейных волн и локализованных состояний во многих пространственно-распределенных системах [Некоркин и др., 2008].

Теоретически и экспериментально обоснована концепция многоуровневого описания деформируемого твердого тела как нелинейной иерархически организованной системы [Панин и др., 2012; Пантелеев и др., 2013]. Сформулированы ключевые идеи и на качественном уровне обоснованы представления об особенностях неупругого деформирования и последующего разрушения «пластичных» и «хрупких» сред. Отмечается, что любой прогноз разрушения в принципе невозможен без учета многомасштабной иерархической природы процесса разрушения. Установлено, что для сложных иерархических систем типичным являются:

- коррелированное поведение их подсистем,
- самоорганизованный характер критичности,
- наличие длинных причинно-следственных связей.

Появились работы, анализирующие решения уравнений механики деформируемых твердых тел [Даниленко, 2010].

Автомодельность — важная особенность эволюции деформируемых нелинейных систем в случае коррелированного поведения их подсистем.

Имеются весомые основания предполагать, что такая сложная динамическая система, как геосреда, которая упорядочивает себя в зависимости от скорости, с которой поступают энергия и вещество, может быть представлена в виде автоколебательной системы, в которой реализуются нелинейные процессы как в пространстве, так и во времени. При этом акценты современной теории автоколебаний также сместились в сторону более сложных, в том числе хаотических колебаний, в основу которой положены следующие динамические принципы [Некоркин и др., 2008]:

- исследование структурно устойчивых систем и явлений, поведение которых устойчиво к малым вариациям параметров;
- анализ структуры разбиения фазового пространства системы;
- исследование эволюции колебательно-волновых процессов, выявление бифуркаций,

определяющих принципиальную перестройку этих процессов [Лоскутов, 2013].

Подвергается существенной переоценке роль хаоса в процессах эволюции нелинейных сложных систем. Во-первых, хаос необходим для вывода системы на один из возможных аттракторов. Во-вторых, хаос лежит в основе механизмов объединения более простых структур в сложные. И, в-третьих, хаос может выступать в роли механизма смены режимов поведения системы. Заметим, что здесь следует отличать детерминированный хаос, математическим образом которого служит странный аттрактор, от стохастических процессов в классическом смысле, которые для своего описания требуют учета флуктуаций в переходных динамических уравнениях либо непосредственно подчиняются уравнениям для плотности распределения вероятностей статистической теории.

Отмечается возрастающий интерес к задачам прогностической реконструкции (построению параметризованных математических моделей) систем, порождающих наблюдаемые переходные процессы (сейсмический, сейсмоакустический, электромагнитный и др.) [Лоскутов, 2013].

Установлена важная особенность коллективных процессов и явлений в сложных динамических системах. В их поведении весьма отчетливо проявляются аналогии, свидетельствующие о наличии общих принципов их эволюции независимо от микроскопической природы. Это обстоятельство послужило основой для разработки некоей типовой схемы реконструкции уравнений их динамики. В частности, предложены и получили развитие два способа построения прогностических моделей их эволюции:

- на основе уравнений движения, уравнений для силовых полей и др.;
- эмпирических моделей динамических систем, построенных на основе прямого анализа наблюдаемых данных [Лоскутов, 2013].

При этом большую роль в описании поведения системы играет геометрическое представление ее эволюции «в целом», т. е. в терминах аттракторов, переходных состояний, устойчивости, бифуркаций, динамического хаоса и др. Основной элемент такого исследования — прослеживание фазового портрета и его изменений при непрерывном изменении параметров модели вдоль некоторой кривой в пространстве параметров.

Заметим, что с позиций математики бифуркация — это смена топологической структу-

ры разбиения фазового пространства динамической системы. Точки бифуркации или структурно-фазовых переходов являются ключевыми, так как в них гармонизируются адаптивность и динамическая устойчивость сложной системы в процессе эволюции при изменяющихся внешних условиях притока энергии. Качественно перестройка фазового портрета представляется бифуркацией, а установившееся движение — аттрактором.

Предложены фундаментальные теоретические идеи и методы, обосновывающие типовые схемы реконструкции уравнений динамики. В частности, при выборе структуры уравнений — это теоремы Такенса для восстановления значений вектора состояния системы и обобщенной аппроксимационной теоремы для задания оператора ее эволюции [Лоскутов, 2013] при оценке параметров (минимизация различных целевых функций, а при проверке адекватности модели расчет метрических и топологических характеристик аттрактора).

Тем не менее, в геофизической практике получить удовлетворительную модель процесса, в частности сейсмического, с помощью существующих универсальных подходов все еще не удается. Очевидно, трудности моделирования геосистем связаны, в первую очередь, с их необычностью и сложностью, проблемой выбора удобных для измерений и достаточных для динамического описания переменных, их адекватного усреднения и абстрагирования от деталей. Не существует и оптимального рецепта построения пространства динамических переменных эмпирической модели по пространственно-распределенным экспериментальным данным. В то же время их удачный набор и предопределяет эффективность эмпирической модели, поскольку тем самым задается проекция ее аттрактора, на которой и строится оператор эволюции. Очевидно, оптимальность такого выбора и является ключевой проблемой эмпирического моделирования распределенных динамических систем.

Проблема, которая при таком подходе требует особого внимания — это выбор удобных для измерений и достаточных для динамического описания переменных. Такие конструкции в настоящее время активно развиваются многими специалистами по нелинейной динамике. Однако стали вырисовываться и пределы применимости этих подходов. Во-первых, размерность динамических систем должна быть не очень большой и, во-вторых, характерные временные масштабы в исследуемых системах

не должны очень сильно различаться. В итоге, несмотря на обилие математических моделей в данной области, их возможности при расширении задач прогноза весьма ограничены. Тем самым воспользоваться сложившейся типовой схемой реконструкции уравнений динамики, исследовании фазового пространства системы и пространство параметров модели с целью получения информации о поведении системы предсказать ее возможные бифуркации в геофизической практике пока не удается.

Развитие и адаптация соответствующих алгоритмов применительно к прогнозу сейсмических событий были реализованы в Международном институте математической геофизики и теории прогноза землетрясений РАН. В этом контексте, очевидно, следует упомянуть регулярно обновляемый уже на протяжении 25 лет среднесрочный прогноз на основании алгоритмов M8 и MSc.

Как известно, алгоритм M8 основан на анализе текущих данных каталогов землетрясений и нацелен на обнаружение совокупности аномалий сейсмичности заданного вида, а алгоритм MSc служит для уточнения пространственной области грядущего события [Левин и др., 2011].

Установлено, что в рамках типичных систем с самоорганизованной критичностью существует модель сейсмического процесса, крупные события которой эффективно прогнозируемы с помощью адаптированных предвестников сильных землетрясений [Шаповал, 2011].

Показано, что предвестники сильных землетрясений достаточно универсальны. Но, как следствие этой универсальности, соответствующие алгоритмы прогноза обладают определенной ограниченностью в их использовании без необходимой детализации [Шаповал, 2011].

В итоге проблема прогноза сильных землетрясений оказалась существенно более сложной, чем это предполагалось еще несколько лет назад, а соответствующие алгоритмы — недостаточными для реального практического применения [Гуфельд, 2013]. И хотя вытекающие из теории самоорганизованной критичности следствия и алгоритмы не привели к конкретным результатам, они способствовали пониманию сложности проблемы и послужили основой для создания более совершенных и адекватных природным ситуациям моделям [Состояние..., 2013; Любушин, 2011; Пантелеев и др., 2012].

Заметим, что подход А. А. Любушина основан на выявлении скрытых признаков роста синхронизации сейсмических шумов (в част-

ности, на анализе коэффициентов множественной синхронизации мультифрактального спектра сингулярности).

Работа [Пантелеев и др., 2012] посвящена рассмотрению ключевых вопросов физики и механики разрушения с целью моделирования процесса формирования потенциального очага землетрясения.

Тем не менее до настоящего времени сейсмология и прогноз сейсмичности переживают сложный период. Детали сейсмического процесса все еще не изучены с достаточной полнотой, не существует и его общепризнанной механической модели. Существует мнение о безысходности в представлениях о сейсмическом процессе [Гуфельд, 2013]. При этом в связи с неудачей многочисленных попыток прогноза кажется естественным вопрос: действительно ли существует принципиальная возможность его реализации с необходимой точностью? Согласно весьма распространенным представлениям, он, в принципе, возможен, по крайней мере, в вероятностном понимании [Родкин, 2008]. Иначе говоря, тезис о непредсказуемости не соответствует реальной ситуации: теоретически невозможный прогноз оказался отчасти реализованным на практике, хотя предикторы, обладающие определенной надежностью, могут быть получены, очевидно, лишь из теоретических представлений о физике процесса. При этом в качестве основной задачи становится краткосрочный прогноз эпицентральной области сильных сейсмических событий. Однако реальность и возможность решения этой задачи остаются весьма дискуссионными. Так, согласно [Короновский, Наймарк, 2013], имеющиеся немногочисленные успешные прогнозы объясняются «...удачным совпадением с реальностью», а в качестве обоснования такого тезиса отмечается, что «... можно предвидеть детерминированно-хаотический характер нелинейного процесса в целом, отдельных его стадий, сценариев перехода от одной стадии к другой. Но требуемая надежность и точность краткосрочных прогнозов конкретных событий остаются недостижимыми».

Приведем еще одно, совсем недавнее, утверждение аналогичного рода: «... доказано, что сеймотектонические системы принадлежат к классу систем с самоорганизованной критичностью, в которых реализуется детерминированно-хаотическое поведение с непредсказуемостью конкретной динамики и катастроф (землетрясений, оползней)» [Захаров, 2014].

Разумеется, такой вывод по существу бросает тень на существующую методологию и алгоритмы прогноза сейсмичности. Он соответствует идеям конца прошлого века, в соответствии с которыми системы, обладающие масштабной инвариантностью, было принято считать непредсказуемыми. Но так ли это в действительности?

Во всяком случае, очевидно, пришло время подумать, почему мы так думаем (или считаем) и что по этому поводу свидетельствуют новейшие экспериментальные и теоретические исследования сейсмического процесса? К ним могут быть отнесены результаты по анализу стационарных режимов активных систем, у которых диссипация компенсируется притоком энергии, новые идеи и подходы, основанные на изучении нестационарных процессов и метастабильных состояний, синхронизации автоколебательных процессов, в том числе синхронизации хаотических автоколебаний, структурной устойчивости переходных режимов, синергетики геосистем [Лоскутов, 2007, 2010; Спивак, 2008; Анищенко и др., 2010; Летников, 2011; Руманов, 2013; Шуман, 2014а и б].

Несомненный интерес представляют экспериментально установленные факты о специфической модификации спектра флуктуаций на заключительной стадии подготовки сейсмического события, наличия отчетливых периодов активизации и затишья [Гульельми и др., 2014].

Таким образом, круг вопросов, требующих дальнейших исследований в этой области, весьма широк. Однако, не отрицая важности аналитических и численных результатов, опыта и интуиции сейсмологов, решение проблемы прогноза связано, скорее всего, с результатами проектов, а не проблем, которые обычно пытаются решать в рамках старых, а не новых идей.

В настоящей статье коснемся отдельных аспектов этой весьма сложной проблемы, обсуждение которых начато в предыдущих публикациях автора, не нашедших пока должного отражения в геофизической литературе.

Геосистемы и процессы в них. Принято считать, что литосферу в целом, как и ее части, целесообразно рассматривать как систему. Напомним, что геосистемы — это совокупность составных частей литосферы, объединенных потоком энергии и вещества. Они являются динамическими системами. В них всегда идут необратимые диссипативные процессы, в которых растет энтропия. Важная функция геосистемы — внутреннее перераспределение и рассеивание энергетических и информацион-

ных ресурсов, поступающих из низов литосферы и окружающей среды, а пространственно-временная «конкуренция» за эти ресурсы ее подсистем — это и есть тот динамический механизм, который и обеспечивает ее нестационарное поведение. При этом геосистема упорядочивает себя в зависимости от скорости поступающих в нее энергии и вещества. В свою очередь, она состоит из подсистем, каждая из которых представляет сложноорганизованную структуру с различной нелинейностью, которая, вообще говоря, в значительной степени и определяет в них пространственно-временную изменчивость, явления и процессы. Эти подсистемы функционируют скоординированно на некоторых интервалах времени, распадаясь затем и формируя новые образования за счет возникающих и исчезающих функциональных связей, обусловленных вариациями поступающих энергетических ресурсов. Протекающие при этом процессы также имеют кооперативный (коллективный) характер. Сейсмический процесс — тоже результат эволюции такой многомасштабной иерархически организованной нелинейной динамической системы.

Как известно [Кадомцев, 1994], при подпитке энергией извне диссипативная система может испытывать устойчивые (в фазовом пространстве) колебания или перейти в режим сложного стохастического движения (странного аттрактора). В таких системах в процессе развития их фазовый объем сокращается, а все траектории в фазовом пространстве принадлежат соответствующему аттрактору. При выведении системы с помощью внешнего воздействия из заданного аттрактора она эволюционирует к другому, зона притяжения (бассейн) которого покрывает точку начального состояния системы.

Процесс упорядочения, который может развиваться в условиях открытой неравновесной структуры, — литосферы — с включением флюидных систем. Разумеется, весьма проблематично дать общее определение, которое включало бы все эффекты взаимодействующих в этом процессе подсистем, так как каждая из них также представляет собой сложную динамическую систему со своими временными масштабами.

Перечислим некоторые процессы, которые являются типичными и могут быть реализованы в геосистемах: синхронизация под действием внешнего периодического или случайного воздействия; авторезонанс как резонанс под действием силы, порождаемой самой систе-

мой; динамический и стохастический резонанс; шумоиндуцированные переходы; перемежаемость как непрерывный переход от регулярного движения к хаотическому.

К важнейшим типам колебательных процессов в геосистемах относятся так называемые автоколебательные процессы или автоколебания. Важное свойство автоколебательных систем, независимо от начальных условий «самонастраиваться» на режим функционирования, определяемый исключительно внутренними параметрами диссипативной системы [Анищенко и др., 2010]. Выделяют класс нелинейных диссипативных систем, которые не являются автоколебательными, — стохастические автоколебательные системы, в которых шум приводит к возникновению колебаний, обладающих чертами автоколебательного режима.

Для автоколебательных систем характерны такие явления, как синхронизация и конкуренция мод — подавление одних колебательных мод другими. Эти эффекты оказываются принципиально важными и для появления высокоорганизованных структур в неравновесных диссипативных средах. В таких средах, помимо автоколебаний, возможно формирование автоструктур, не связанных с граничными условиями пространственно-временных образований, параметры которых всецело определяются лишь свойствами такой среды.

Автоколебательные системы разделяются на два типа: осцилляторные и релаксационные. При этом релаксационные автоколебания с частичным сбросом энергии в виде сейсмоакустической и электромагнитной эмиссии изменяют фон естественных импульсных электромагнитных и сейсмоакустических полей Земли.

Известны различные источники автогенерации волн в активных средах. В частности, в неоднородных системах источником бегущих волн могут быть области, в которых собственная частота колебаний выше, нежели в окружающем их пространстве. Причем в случае наличия нескольких таких источников среда синхронизируется самым высокочастотным из них [Васильев и др., 1979]. Примечательно, что неоднородные активные среды вследствие порогового эффекта могут гасить автоволновые процессы. Автоволны взаимодействуют между собой и координируются, в итоге формируется и сохраняется наиболее устойчивая и геометрически простая конфигурация со стоячими волнами. Напомним, что синхронизация, которую можно рассматривать в качестве ме-

тогда самоорганизации взаимодействующих систем, возникает лишь в автоколебательных системах. Важно, что активные среды в ходе автоволновой синхронизации могут сопрягать процессы, соизмеримые в пространстве и времени.

К настоящему времени известно несколько типов автоволновых процессов: бегущие импульсы, стоячие волны, синхронные колебания во всем пространстве, диссипативные структуры и др. [Васильев и др., 1979]. Термин «диссипативная структура» подчеркивает термодинамический аспект проблемы: они рождаются и существуют в термодинамически активных системах (геосреде) за счет диссипативных процессов утилизации энергии.

Геодинамические системы и хаос. Анализ нелинейных хаотических динамических систем — актуальная задача современного этапа исследований, а фракталы и хаос — подходящее средство исследования геосистем. Установлено, что хаос в нелинейных динамических системах может возникать универсальными способами, независимо от природы системы. При этом случайность может быть обусловлена как ее внутренними свойствами, так и внешними факторами [Лоскутов, 2010].

Как известно, долгое время представление о хаосе ассоциировалось с тем, что в системе необходимо, по крайней мере, возбуждение большого числа степеней свободы. Но, как оказалось, существо дела даже здесь не в сложности системы и не во внешних шумах, а в появлении при некотором значении параметров системы экспоненциальной неустойчивости движения. Динамика систем, обусловленная такого рода неустойчивостью, получила название детерминированного (или динамического) хаоса.

Неожиданным явилось установление факта, что именно хаос определяет основные черты поведения системы, а не шумы внешнего происхождения [Лоскутов, 2007]. В то же время проблема слабого хаоса все еще остается нерешенной [Дайсон, 2010]. Она состоит в том, что хаотические движения часто ограничены определенными рамками и не приводят к катастрофической неустойчивости. Слабость хаоса — ключевое условие существования литосферы. Слабый хаос существенно отличается от полностью хаотического поведения. Он проявляется в том, что хотя близко расположенные траектории и расходятся вначале экспоненциально, но их дальнейшее удаление ограничено, и система как целое не разлетается на куски [Дайсон, 2010]. При этом в некотором диапазо-

не частот система может усиливать мощность шума, а колебания системы обладают свойством «синхронизируемости» как под действием внешнего воздействия, так и в результате взаимодействия [Анищенко и др., 2010].

Заметим, что по мере становления нелинейной динамики и с появлением теории динамического хаоса явление синхронизации было обобщено и на хаотические колебания в системах весьма различной природы. При этом под синхронизацией хаоса понимается явление возникновения периодического режима под влиянием внешнего воздействия на хаотические автоколебания или в результате взаимодействия хаотических движений элементов системы (ее подсистем). Однако этот переход от хаотических колебаний к регулярным реализуется лишь при достаточной интенсивности взаимодействия подсистем (что указывает на существование порога) и связан, очевидно, с механизмом синхронизации через подавление хаотических автоколебаний. Следовательно, синхронизацию можно рассматривать как метод самоорганизации взаимодействующих подсистем. При этом реализуется эффект увеличения крупномасштабных флуктуаций при подавлении мелкомасштабных, причем независимо от начальных условий. С физической точки зрения этот эффект является следствием конкурентной динамики в развитии и организации подсистем, их способностью объединяться во взаимно синхронизованные ансамбли в соответствии с принципом максимальной диссипации энергии. Именно при таком объединении возникают структуры, которые получают преимущества в «конкуренции» за внутреннее перераспределение энергетических ресурсов.

Другая важная сторона рассматриваемых нелинейных систем — временное запаздывание в связях между их элементами (подсистемами), обусловленное конечной скоростью распространения сигналов и наличием в системах медленной динамики, т. е. динамически скоррелированных процессов, существенно более медленных, чем быстрый (со скоростью распространения возмущений) информационный обмен в динамической системе. При этом медленную динамику деформируемой нелинейной системы в деформируемых средах составляют процессы локализации деформаций и повреждений, формирование деформационных фронтов различных масштабов и различных волн повреждений. Как оказалось, роль медленных фронтов деформаций велика

как в процессах формирования областей локализации неупругих деформаций в пластичных средах, так и очагов разрушения в хрупких [Макаров, 2012]. Исследования показали, что временное запаздывание в связях может приводить к существенному и неформальному усложнению коллективной динамики системы, возникновению в ней новых динамических свойств, в частности существенному росту длительности переходных процессов, росту областей мультистабильности и появлению ее новых типов. В итоге мультистабильность можно считать одним из характерных свойств ансамблей подсистем (блоков) с запаздывающими связями [Клиньшов, Некоркин, 2013].

С этой точки зрения динамический анализ метастабильных состояний и переходных динамических процессов, связанных с взаимодействием различных подсистем, их конкуренцией (подавлением в автоколебательных системах одних мод другими) и синхронизацией во времени означает, очевидно, рождение нового направления в развитии теории геосистем и ее практических приложений. Весьма вероятно, что именно эти ключевые динамические объекты окажутся способными перевести моделирование поведения и развития геосистем на новый уровень понимания и реализации. Сфокусируем дальнейшее рассмотрение на некоторых аспектах, особенностях и возможностях такого описания, новых подходах к сбору экспериментальных данных и их обработке.

Синергетика геосистем и спонтанный шум литосферы. Как уже упоминалось, в соответствии с флуктуационно-диссипативной теоремой статистической физики геометрический (спонтанный) шум литосферы — это универсальный эффект. Он обусловлен только наличием диффузии и может проявляться при генерации возмущений весьма различной природы. И эмиссионное сейсмоакустическое и электромагнитное излучение является отражением собственной эволюции геосреды, а его спектр отражает стадию этой эволюции. Следует учитывать также возможность различного физического содержания процессов его генерации на различных уровнях геометрически самоподобной блоковой геосистемы, в частности генерации связанных акустоэлектромагнитных возмущений в диапазоне Гц—кГц [Дмитриевский, Володин, 2006; Шуман, 2012].

Очевидно, эмиссия должна рассматриваться в терминах динамических понятий устойчивости, аттракторов в фазовом пространстве и их бифуркаций. Как известно, одна из моделей

описания флуктуаций сейсмоакустической и электромагнитной эмиссии в процессе перестройки структуры пород связана с перколяционной моделью диффузионного фронта. Модель фронта градиентной скалярной перколяции (протекания) как неравновесного фазового в открытой системе, в принципе позволяет дать физическую интерпретацию наблюдаемых параметров сейсмоакустических и электромагнитных шумов как неравновесного самоорганизованного критического явления [Зосимов, Лямшев, 1995]. С экспериментальной точки зрения именно фронты самоорганизованной критичности являются наиболее энергетически активным источником спонтанных излучений — и сейсмоакустических, и электромагнитных.

Таким образом, суть нового подхода к описанию эмиссий геосреды состоит в утверждении, что сейсмичность, спонтанная геоакустическая и электромагнитная эмиссии — это непрерывные во времени переходные динамические процессы, связанные с взаимодействием различных ее подсистем (блоков) и с их синхронизацией во времени. В стабильном состоянии большинство этих подсистем демонстрируют сложную хаотическую динамику, которая отражает относительно слабое (фоновое) взаимодействие протекающих процессов, характеризующихся разными временными масштабами. Такое поведение и состояние обеспечивает геосреде возможность быстрого реагирования и адаптации на поступающую из низов литосферы дополнительную энергию, негэнтропию или изменения ее (геосреды) физических характеристик.

Имеются весомерные основания считать, что геометрический шум литосферы может быть истолкован в терминах автоколебаний. Как известно, энергетическая и флюидная подпитка вызывает увеличение неравновесности и неустойчивости геосистемы. Рост неустойчивости ведет к формированию флуктуаций, которые при дальнейшем росте энергетической подпитки преобразуются в автосолитоны, тип которых определяется их характерными пространственно-временными масштабами. При этом структура колебаний определяется масштабами, ограничивающими диапазон проявления фрактальных свойств. Существенно, что образование фрактальных агрегатов резко увеличивает мощность генерируемых средой эмиссий. Имеются экспериментальные подтверждения резких изменений фрактальной размерности генерируемых эмиссий при при-

ближении к точке бифуркации системы (к сейсмическому событию) [Зосимов, Лямшев, 1995].

Очевидно, для описания многомасштабной структуры и свойств геосреды как диссипативной динамической системы требуются новые весьма специфические концепции и подходы. Один из них — многоуровневый подход к моделированию процессов деформации и разрушения твердых (и хрупких, и пластических) тел, согласно которому деформируемая среда представляет собой самоорганизующуюся нелинейную многоуровневую систему, в которой возникшая при нагрузке деформация самосогласованно развивается как последовательная эволюция механизмов релаксации локальных напряжений и диссипации энергии [Псахье, 2013]. Важная особенность отклика такой деформируемой среды — образование диссипативных мезоструктур и фрагментация деформируемого материала. Возможные механизмы релаксации напряжений:

- в виде квазипластического деформирования среды;
- в виде локализованной катакластической деформации, мигрирующей по пространству;
- в виде лавинно-неустойчивого роста дефектов в локализованной пространственной области, уменьшающейся с течением времени;
- в очаге хрупкого разрушения [Макаров, 2012; Панин и др., 2012].

Установлены механизмы формирования локальных зон сильнонеравновесных состояний, в которых зарождаются дефекты различного масштабного уровня. При этом необходимость самосогласования сдвигов на различных структурно-масштабных уровнях обуславливает распространение в деформируемом твердом теле нелинейных волн канализированных локальных структурных превращений [Панин и др., 2012].

Новый аспект проблемы, не нашедший пока должного отражения в литературе — исследование совместного действия полей напряжений и диффузионного потока легких газов (водорода, гелия и др.), пронизывающего литосферу. И. Гуфельд подчеркивает две основные особенности эффектов имплантации легких газов в различные геоматериалы: структурные перестройки и аморфизация структуры [Гуфельд и др., 2011]. Общим следствием их имплантации является формирование внутреннего состояния, проявляющегося в эффектах ползучести и изменении объема. Важно, что прохождение восходящего потока легких газов непосред-

ственно ведет к непрерывному изменению деформационных параметров горных пород на различных пространственно-временных масштабах [Гуфельд, 2007, 2013].

Существенно, что эксперимент свидетельствует о синергетическом характере поведения этих факторов: отклик системы многократно возрастает.

Удается наблюдать деформации, на порядок больше тех, которые возникают при воздействии каждого из этих факторов по отдельности [Спивак, 2008]. Возможно, это связано с возникновением особого состояния вещества, способствующего дополнительному снижению его устойчивости к действию сдвиговых деформаций. В итоге становится возможным возникновение (или инициирование) кратковременных высокоамплитудных (катастрофических) сдвиговых смещений.

Важным представляется и влияние на эти процессы шумов как внешнего, так и внутреннего происхождения. Следовательно, возникает важная с прикладной точки зрения задача исследования совместного действия напряжений и параметров диффузионного потока легких газов (водорода, гелия), изучение отклика такой системы на многочастотные и шумовые воздействия. В известной степени это дополняет и расширяет исходные принципы физической мезомеханики, акцентирующей внимание на описании твердого тела как иерархически организованной системы, волновом (автоволновом) характере распространения элементарного сдвига, разрушении как нелинейного волнового процесса глобальной потери сдвиговой устойчивости нагружаемого тела [Панин и др., 2012]. Заметим, что в стабильном состоянии геосреда демонстрирует сложную хаотическую динамику. Такое состояние, как известно, обеспечивает геосреде возможность быстрого реагирования на вновь поступающую извне энергию, упорядочивая себя в зависимости от скорости поступления энергии и вещества.

Переходная динамика и критерии близости бифуркации стационарного режима. Согласно устоявшимся традициям, поиск и изучение предвестников землетрясений явно или неявно основаны на теоретических принципах и результатах теории катастроф. С математической точки зрения теория катастроф — это определение качественных изменений решений нелинейных дифференциальных уравнений, определяющих состояния, далекие от равновесия в зависимости от управляющих

параметров: это совокупность, синтез приложений теории особенностей гладких отображений К. Уитни и теории бифуркаций А. Пуанкаре и А. Андронова.

Катастрофа происходит в виде резкого изменения состояния системы при плавном изменении управляющих параметров. Установлено, что с приближением к катастрофе (бифуркации) происходит аномальный рост флуктуаций в системе, критическое замедление, понижение частот колебаний для некоторых мод («смягчение» мод вблизи «точки разрушения» [Гульельми и др., 2014]), рост времен релаксации и корреляционных длин, ряд других явлений. Наиболее исследованный предвестник сейсмического события — повышение сейсмической активности в разные интервалы времени, предшествующие сильным землетрясениям, сейсмическое затишье или сочетание активизации и затишья в разных пространственно-временных областях [Панин и др., 2012]. В то же время классический способ предсказания катастроф связан с восстановлением по экспериментальным данным (временным рядам) неизвестных уравнений. Однако такую процедуру реально провести лишь в случае небольшого числа степеней свободы (числа уравнений), что в случае распределенных систем крайне проблематично. Кроме того, эффективность моделирования остается весьма ограниченной ввиду отсутствия необходимых данных и соответствующих технологий исследования геосреды с достаточным пространственным и временным разрешением. Имеющийся опыт динамического моделирования включает в себя набор элементарных моделей геосреды, развитой техники анализа, необходимой для понимания ее поведения хотя бы в целом. Ведущую роль в таком описании несомненно играет геометрическое представление эволюции геосистемы в малоразмерных проекциях ее фазового пространства.

При этом поведение системы может быть описано в терминах аттракторов, переходных состояний, устойчивости, бифуркаций хаоса и др. [Рабинович, Мюезинолу, 2010]. Ее динамика определяется временами пребывания в аттракторах и переходами между ними, а «плавные» деформации фазового пространства не приводят к качественным изменениям динамики системы. Однако в последнее время стали ясны и пределы применимости такого подхода. В частности, такое описание динамики сложных диссипативных систем, состоящих из многих взаимодействующих подсистем,

действительно, если плотности всех потоков, пронизывающих систему (энергии, материи и информации), достаточно сбалансированы и стационарны, а связи между подсистемами близки к симметричным [Рабинович, Мюезинолу, 2010]. Именно в этом случае фазовое пространство разбивается на области притяжения разных аттракторов — равновесию, периодическим колебаниям или странному аттрактору, одному из которых может соответствовать разрушение системы. В общем случае система может стремиться к одному из возможных аттракторов. При ее выведении из заданного аттрактора система будет эволюционировать к другому аттрактору, зона притяжения которого покрывает точку начального состояния системы. В таких сложных физических системах с многими аттракторами может развиваться процесс самоорганизации [Кадомцев, 1994].

Напомним, если мы имеем некоторую матрицу взаимодействия между подсистемами или элементами системы $\varphi_{ij}(E)$, где E — энергия или энтропия, поступающая в систему, то при связях, близких к симметричным $\varphi_{ij}(E) \approx \varphi_{ji}(E)$, система демонстрирует мультистабильность или сосуществование в фазовом пространстве двух или более устойчивых состояний. При этом то состояние, к которому приходит система, определяется начальными условиями. Иначе говоря, в случае симметричных связей динамика системы представляет собой приближение к какому-либо устойчивому состоянию равновесия.

Что мы имеем в случае геосреды? Очевидно, поток энергии из мантии в литосферу, определяемый восходящим потоком легких газов водорода и гелия, непрерывен. Происходит процесс непрерывных преобразований структуры и свойств геосреды литосферы. И хотя процессы дегазации на современном этапе эволюции геосреды носят слабопеременный характер, на этом фоне проявляются импульсы дегазации на различных пространственных масштабах — от локального (в пределах отдельных блоков, их кластеров или отдельных граничных структур) до регионального. Постоянно изменяются физико-химические и физико-механические свойства элементов и параметров контактного взаимодействия (связей) в граничных структурах и внутри блоков за счет их взаимодействия с этими восходящими потоками легких газов и флюидов. Быстрая изменчивость параметров может коренным образом менять геотектонические условия — от фоновых до критических. Сейсмический процесс в итоге

также в значительной степени контролируется интенсивностью этих восходящих потоков, их пространственной распределенностью в рассматриваемый период времени и степенью их разгрузки в приповерхностный ненагруженный слой земной коры. Следовательно, предположение о стационарности и сбалансированности открытых нелинейных геосистем, о симметрии связей между ее отдельными подсистемами (элементами) явно нереалистично.

Напомним также, что геосреда может пониматься также как иерархия подсистем с различной нелинейностью. Но, как известно, сильная нелинейность может усилить диссипацию и разрушить фазовую структуру системы. Перечисленные факторы резко осложняют или, возможно, закрывают возможности традиционных подходов к моделированию ее динамики, в частности сложных переходных состояний. Действительно, в частности, хотя в этом случае устойчивые состояния и существуют, однако при этом область притяжения к тому или другому аттрактору может постоянно или даже весьма быстро меняться. Понятно, что описание таких динамических систем требует новых идей и подходов. Разумеется, в общем случае для полного описания систем, к которым относится и геосреда (открытая неравновесная система кроме баланса массы, импульса и энергии), необходимо рассматривать и баланс энтропии, включающий качество приходящей к системе энергии и производство энтропии в физико-химических процессах, происходящих в системе [Изаков, 1997]. Но, к сожалению, такой подход весьма затруднен и очень сложно формализуется. В итоге получила широкое распространение теория состояний, далеких от равновесия, как синтез трех направлений исследований, а именно — методов описания существенно неравновесных процессов, термодинамики открытых систем и теории катастроф. Это синергетика или теория диссипативных структур.

Новая парадигма нелинейной динамики (теория самоорганизованной критичности — эволюции системы к критическому состоянию без настройки каких-либо параметров) привлекла к себе повышенное внимание и переоценку взглядов на динамику иерархических систем. Предложены новые идеи и подходы, основанные на анализе нестационарных процессов и метастабильных состояний как ключевых динамических объектов. Получили развитие работы по исследованию спектра шумов в сложных системах. Установлено, что нарас-

тание низкочастотных мод в спектре шумов системы и рост обобщенной синхронизации являются надежными признаками приближения бифуркации стационарного режима — предвестниками катастроф.

Заключение. Можно предположить, что проблема прогноза сейсмической активности в настоящее время переживает период, в котором сочетаются черты эволюции и кризиса. На данный момент не удастся отобразить имеющуюся обширную эмпирику на одинаково разделяемой всеми аксиоматике. Однако тезис о принципиальной непредсказуемости сейсмических событий не имеет под собой достаточных оснований и не отвечает реальной ситуации. Стало очевидным, что такой прогноз невозможен без понимания основных механизмов, особенностей и закономерностей локализации деформационных процессов и формирования очагов разрушения в геосреде. Имеются весомые основания предполагать, что в основе большинства явлений в геосреде являются свойства открытых диссипативных систем. Как известно, их эволюция характеризуется самоорганизацией протекающих в них процессов и иерархией масштабов.

Новая парадигма заключается в том, что и сейсмичность, и спонтанная электромагнитная эмиссия литосферы — это результат устойчивой переходной активности геосреды, непрерывных во времени переходных динамических процессов, связанных с взаимодействием различных подсистем (блоков) геосреды, их «конкуренцией» за энергетические ресурсы и синхронизацией (координацией) во времени. При этом метастабильность и устойчивые переходы — одни из ключевых динамических объектов, которые способны перевести моделирование на новый уровень понимания и реализации. Важно, что и сейсмоакустическая, и электромагнитная спонтанная эмиссия обладают ярко выраженными свойствами нелинейных процессов, способностью к самоорганизации и хаотизации, характерному поведению при приближении к катастрофе и выхода из нее. С этой точки зрения на повестке дня — проект динамической сейсмологии и геоэлектрики.

Диссипативность динамики, компенсация энергетических потерь за счет внешних источников, активность отдельных подсистем или элементов геосреды (блоков разного ранга) являются типичными для автоколебательных систем нелинейной динамики. Термины автоколебания, автоволны, автоволновые процессы подчеркивают тот факт, что их характе-

ристики определяются параметрами геосреды и, что весьма важно, не зависят от начальных и граничных условий, т. е. задание текущего состояния системы. Кажется очевидным, что в условиях, когда невозможно точно оценить начальные условия, идея использовать с целью прогноза параметры и характеристики процесса, формирующиеся в условиях быстрого забывания (короткой памяти) о начальных данных как и положение о слабости хаоса в реальных геосистемах, весьма перспективно. Важно, что и акустосейсмический и электромагнитный (геометрический) спонтанный шум как универсальный эффект, который в соответствии с флуктуационно-диссипативной теоремой физики обусловлен только наличием диффузии и проявляется при генерации возмущений различной природы, может быть истолкован в терминах автоколебаний. Ввиду неизбежности генерации автоволн в активной геосреде, представление об автоволновых механизмах самоорганизации получает в последнее время все более широкое распространение. Соответственно, спонтанная эмиссия литосферы может быть истолкована в терминах динамических понятий устойчивых состояний, аттракторов в фазовом пространстве и их бифуркаций, а ее динамика определяется временем пребывания в этих состояниях (аттракторах) и переходами между ними. При этом сам переходный процесс — это движение, которому соответствует фазовая траектория в области притяжения аттрактора. При отсутствии внешнего шума фазовая траектория будет принадлежать тому или иному аттрактору в зависимости от начальных условий. Достаточно наличие шума любой интенсивности, чтобы в ансамбле подсистем геосреды наблюдался эффект стохастического резонанса. Исследование синхронной динамики автоколебательных систем различной природы и влияния шумов на синхронизацию — одна из актуальных задач современной нелинейной динамики, а одно из главных ее достижений XX в. — обнаружение универсальных сценариев перехода от упорядоченного движения к хаотическому при изменении параметров системы. В частности, нарастание низкочастотных мод в спектре шумов геосистемы и рост обобщенной синхронизации — надежные предвестники приближающейся бифуркации стационарного (метастабильного) режима. Этот тандем в определенной степени решает проблему диагностики перехода от русла к джокеру, поставленную Г. Г. Курдюмовым и С. П. Малинецким.

Весьма вероятно, что в столь сложной ситуации динамический анализ метастабильных состояний и переходных процессов может означать появление нового направления в моделировании геосистем. При этом, очевидно, динамическая модель геосреды должна состоять из двух подсистем: одна нацелена на описание сейсмического (и электромагнитного) процесса в настоящем, а вторая дает возможные варианты будущего ее развития на основании анализа порождаемых системой временных рядов (наблюдаемых) в прошлом и использует нынешнее метастабильное состояние в качестве начальных условий.

Важный аспект проблемы — физика и природа быстрой изменчивости параметров геосреды и учет факторов, способствующих разрушению фазового пространства системы. Весьма вероятно, что ввиду исключительной сложности геосистем для успешного их описания необходимо найти оптимальный уровень усреднения ее параметров и абстрагирования от деталей.

Фундаментальное свойство геосистем — стадия подготовки сильных сейсмических событий: с приближением к событию происходит аномальный рост флуктуаций и так называемое критическое замедление, т. е. понижение частот колебаний некоторых мод (эффект резонанса на нулевой частоте), удлинение шкалы времен релаксации, эффекты синхронизации, увеличение крупномасштабных флуктуаций при подавлении мелкомасштабных, наличие локальных зон затишья и формирование диссипативных структур — цугов медленных деформационных фронтов. Эти признаки универсальны, могут быть обнаружены экспериментально, что вселяет определенный оптимизм. Примечательно, что имеющиеся успешные попытки прогноза вписываются в эту схему.

Таким образом, проблема прогноза сейсмичности, в том числе наиболее актуального — краткосрочного, отнюдь не безнадежна и не свидетельствует о патологической приверженности автора к этой идее. Но для ее решения необходим адекватный мониторинг состояния геосреды, в том числе активный, к которому геофизики пока не готовы, да, собственно говоря, и не ставили такой цели.

Можно предположить, что ближайшей задачей является организация мониторинга на иерархических уровнях организации геосистем, которые в зависимости от этого уровня могут проявлять свойства детерминированных, стохастических, хаотических и сложных

систем, развитие и внедрение адекватных методов обработки больших массивов данных, дополнение пассивного мониторинга активным. Но трудности на этом пути значительны

— они связаны как с недостаточной разработанностью самой нелинейной динамики, так и со сложностью и многообразием процессов, происходящих в геосистемах.

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.
- 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.
- Гульельми А. В., Собисевич Л. Е., Собисевич А. Л., Лавров И. П. О форшоках сильных землетрясений. *Физика Земли*. 2014. № 4. С. 43—49.
- Гуфельд И. А. Возможен ли прогноз сильных коровых землетрясений? *Вестник РАН*. 2013. Т. 83. № 3. С. 236—245.
- Гуфельд И. А. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Научное издание. Королев: ЦНИИМаш, 2007. 160 с.
- Гуфельд И. А., Матвеева М. И., Новоселов О. Н. Почему мы не можем осуществить прогноз сильных коровых землетрясений. *Геодинамика и тектонофизика*. 2011. Т. 2. № 4. С. 378—415.
- Дайсон Ф. Птицы и лягушки в математике и физике. *Успехи физ. наук*. 2010. Т. 180. № 8. С. 859—870.
- Даниленко В. А. Автомодельні ударні хвилі в геосередовищах з просторовою нелокальністю. *Геоінформатика*. 2010. № 2. С. 39—45.
- Дмитриевский А. Н., Володин И. А. Формирование и динамика энергоактивных зон в геологической среде. *Докл. РАН*. 2006. Т. 411. № 3. С. 395—399.
- 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.
- Зосимов В. В., Лямшев Л. М. Фракталы в волновых процессах. *Успехи физ. наук*. 1995. Т. 165. № 4. С. 361—401.
- Изаков М. Н. Самоорганизация и информация на планетах и в экосистемах. *Успехи физ. наук* 1997. Т. 167. № 10. С. 1087—1094.
- Кагомцев Б. Б. Динамика и информация. *Успехи физ. наук*. 1994. Т. 164. № 5. С. 449—530.
- Клиньшов В. В., Некоркин В. И. Синхронизация автоколебательных с запаздывающими связями. *Успехи физ. наук*. 2013. Т. 183. № 12. С. 1323—1336.
- Короновский Н., Наймарк А. Землетрясения: возможен ли прогноз. *Наука и жизнь*. 2013. № 3. С. 37—43.
- Левин Б. В., Родкин М. В., Тихонов И. Н. Великое Японское землетрясение. *Природа*. 2011. № 10. С. 14—22.
- Летников Ф. А. Синергетические аспекты геологического развития Земли. *Изв. Томск. политехн. ун-та*. 2011. Т. 319. № 1. С. 6—11.
- Лоскутов А. Ю. Динамический хаос. Системы классической механики. *Успехи физ. наук*. 2007. Т. 177. № 9. С. 989—1015.
- Лоскутов А. Ю. Очарование хаоса. *Успехи физ. наук*. 2010. Т. 180. № 2. С. 1305—1329.
- Лоскутов Е. М. Эмпирическая реконструкция динамических систем: построение и оптимизация прогностических моделей: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 2013. 27 с.
- Любушин А. А. Прогноз Великого Японского землетрясения и сингулярности сейсмического шума. http://www.seismicweather.com/download/russian_nature_journal.pdf. 2011.
- Макаров П. В. Возможности современных методов геомеханического моделирования в приложении к задачам наук о Земле. Москва: ИФЗ, 2012. 14 с.
- Некоркин В. И., Безручко Б. П., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., Смирнов Д. А., Тасс П. А. Моделирование и диагностика взаимодействия нелинейных колебательных систем по хаотическим временным рядам (приложения в нейрофизиологии). *Успехи физ. наук*. 2008. Т. 178. № 3. С. 323—329.
- Панин В. Е., Егорушкин В. Е., Панин А. В. Нелинейные волновые процессы в деформируемом твердом теле как многоуровневой иерархически организованной системе. *Успехи физ. наук*. 2012. Т. 182. № 12. С. 1351—1357.
- Пантелеев И. А., Плехов О. А., Наймарк О. Б. Модель геосреды с дефектами: коллективные эффекты развития несплошностей при формировании потенциальных очагов землетрясений. *Геодинамика и тектонофизика*. 2013. Вып. 4. № 1. С. 37—51.

- 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.
- Псахье С. Г. Многоуровневый подход к моделированию процессов деформации и разрушения. *Вестник РАН*. 2013. Т. 83. № 5. С. 398—406.
- Рабинович М. И., Мюезинолу М. К. Нелинейная динамика мозга: эмоции и интеллектуальная деятельность. *Успехи физ. наук*. 2010. Т. 180. № 4. С. 371—387.
- Родкин М. В. Прогноз непредсказуемых катастроф. *Вокруг света*. 2008. № 6. С. 64—73.
- Руманов Э. Н. Критические явления вдали от равновесия. *Успехи физ. наук*. 2013. Т. 183. № 1. С. 103—112.
- Состояние исследований по прогнозу землетрясений в Прибайкалье, 2013. Инновационно-внедренческий центр Ин-та земной коры СО РАН. Иркутск. in-vc.ru/tourism/prognoz.html.
- Сливак Л. В. Синергетические эффекты деформационного отклика в термодинамически открытых системах металл — водород. *Успехи физ. наук*. 2008. Т. 178. № 9. С. 897—922.
- Шаповал А. Б. Вопросы прогнозируемости в изотропных моделях с самоорганизованной критичностью: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2011. 35 с.
- 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.
- Шуман В. Н. О прогнозе и прогнозируемости сейсмического процесса. *Геофиз. журн*. 2014а. Т. 36. № 3. С. 48—71.
- Шуман В. Н. Сейсмический процесс и современные мониторинговые системы. *Геофиз. журн*. 2014б. Т. 36. № 4. С. 50—64.

Nonlinear dynamics of geomedium: transitional processes and critical phenomena

© V. N. Shuman

Within the limits of established views on geo-medium as an open nonlinear active hierarchically-heterogeneous system, an attempt has been made to analyze the processes in geo-systems. It has been noticed that the spontaneous seismo-acoustic and electromagnetic noise of lithospheric origin is a universal effect, produced by presence of diffusion. It is essential that spontaneous noise can be interpreted in terms of auto-vibrations, with characteristics determined by parameters of geomedium. The problems of synergetics of the system are under consideration, as well as the role of chaos, including the weak one, in their behavior. Transitional dynamics of geo-systems is analyzed and the criteria of proximity of bifurcation of stationary regime. The fundamental property of geo-systems is accentuated — the presence of the stage of preparation of seismic events that is the evidence of reality of their forecast. However its realization is related to installation of adequate monitoring observation systems and methods of their processing while geophysicists are not ready yet. It is noticed that the solution of the problem of seismic events forecast is evidently connected with the results of projects but not the problems, which are usually tried to be solved within the limits of old but not new ideas.

Key words: nonlinear geodynamics, transients, seismic, electromagnetic emission, metastable, stable transitions.

References

- Anishchenko V. S., Vadivasova T. E., Strelkova G. I., 2010. Self-sustained oscillations of dynamical stochastic systems and their mathematical image — an attractor. *Nelineynaya dinamika* 6(1), 107—126 (in Russian).
- Vasil'ev V. A., Romanovskiy Yu. M., Yakhno V. G., 1979. Autowave processes in distributed kinetic systems. *Usp'hi fizicheskikh nauk* 128(is. 4), 625—666 (in Russian).
- Gul'iel'mi A. V., Sobisevich L. E., Sobisevich A. L., Lavrov I. P., 2014. About foreshocks strong earthquakes. *Fizika Zemli* (4), 43—49 (in Russian).
- Gufeld I. L., 2013. Is it possible to forecast strong crustal earthquakes? *Vestnik RAN* 83(3), 236—245 (in Russian).
- Gufeld I. L., 2007. The seismic process. Physical and chemical aspects. Research publication. Korolev: TSNIIMash, 160 p. (in Russian).

- Gufeld I. L., Matveeva M. I., Novoselov O. N., 2011. Why can not we implement forecast strong crustal earthquakes. *Geodinamika i tektonofizika* 2(4), 378—415 (in Russian).
- Dyson F., 2010. Birds and frogs in mathematics and physics. *Uspehi fizicheskikh nauk* 180(8), 859—870 (in Russian).
- Danilenko V. A., 2010. Self shock waves in geomeidia with spatial nonlocality. *GeoInformatika* (2), 39—45 (in Ukrainian).
- Dmitrievskiy A. N., Volodin I. A., 2006. Formation and dynamics of energy active zones in the geological environment. *Doklady RAN* 411(3), 395—399 (in Russian).
- Zakharov V. S., 2014. Self-similarity of the structures and processes in the lithosphere on the results of the fractal and dynamic analysis: Author's abstract. Dr. geol.-min. sci. dis. Moscow, 35 p. (in Russian).
- Zosimov V. V., Lyamshev L. M., 1995. Fractal in wave processes. *Uspehi fizicheskikh nauk* 165 (4). 364—401 (in Russian).
- Izakov M. N., 1997. Selforganisation and information for planets and ecosystems. *Uspehi fizicheskikh nauk* 167 (10), 1087—1094 (in Russian).
- Kadomtsev B. B., 1994. Dynamics and information. *Uspehi fizicheskikh nauk* 164(5), 449—530 (in Russian).
- Klin'shov V. V., Nekorkin V. I., 2013. Synchronization of delay-coupled oscillator networks. *Uspehi fizicheskikh nauk* 183(12), 1323—1336 (in Russian).
- Koronovskiy N., Naymark A., 2013. Earthquakes: Is it possible to forecast. *Nauka i zhizn* (3), 37—43 (in Russian).
- Levin B. V., Rodkin M. V., 2011. The Great Japanese Earthquake. *Priroda* (10), 14—22 (in Russian).
- Letnikov F. A., 2011. Synergistic aspects of the geological evolution of the Earth. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta* 319(1), 6—11 (in Russian).
- Loskutov A. Yu., 2007. Dynamical chaos. Systems of classical mechanics. *Uspehi fizicheskikh nauk* 177 (9), 989—1015 (in Russian).
- Loskutov A. Yu., 2010. Fascination of chaos. *Uspehi fizicheskikh nauk* 180(2), 1305—1329 (in Russian).
- Loskutov E. M., 2013. Empirical reconstruction of dynamical systems: the construction and optimization of prediction models: Author's abstract. Dr. phys.-math. sci. dis. Nizhny Novgorod, 27 p. (in Russian).
- Lyubushin A. A., 2011. Forecast great Japanese earthquake and the singularity of seismic noise (in Russian). http://www.seismicweather.com/download/russian_nature_journal.pdf.
- Makarov P. V., 2012. Capabilities of modern methods of geomechanical modeling as applied to the earth sciences. Moscow: IPE, 14 p. (in Russian).
- Nekorkin V. I., Bezruchko B. P., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D., Smirnov D. A., Tass P. A., 2008. Methods of wave-based physics in neuroscience problems and applications. *Uspehi fizicheskikh nauk* 178(3), 323—329 (in Russian).
- 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).
- Panteleev I. A., Plekhov O. A., Naymark O. B., 2013. Model of geomeidia containing defects: collective effects of defects evolution during formation of potential earthquake foci. *Geodinamika i tektonofizika* 4(1), 37—51 (in Russian).
- Panteleev I. A., Plekhov O. A., Naymark 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).
- Psakhie S. G., 2013. A multi-level Approach to the Modeling of Deformation and Destruction Processes. *Vestnik RAN* 83(5), 398—406 (in Russian).
- Rabinovich M. I., Myuezinoglu M. K., 2010. Nonlinear dynamics of the brain: emotion and cognition. *Uspehi fizicheskikh nauk* 180(4), 371—387 (in Russian).
- Rodkin M. V., 2008. Forecast unpredictable disasters. *Vokrug sveta* (6), 64—73 (in Russian).
- Rumanov E. N., 2013. Critical phenomena far from equilibrium. *Uspehi fizicheskikh nauk* 183(1), 103—112 (in Russian).
- Status of research on earthquake prediction in the Balkal region, 2013. Innovation center of the Institute of Earth's Crust. Irkutsk. in-vc.ru/tourism/prognoz.html.
- Spivak L. V., 2008. Synergy effects in the deformation response of thermodynamically open metal — hydrogen systems *Uspehi fizicheskikh nauk* 178(9), 897—922 (in Russian).
- Shapoval A. B., 2011. Questions predictability in the isotropic model with self-organized criticality: Author's abstract. Dr. phys.-math. sci. dis. Moscow, 35 p. (in Russian).
- Shuman V. N., 2012. Electromagnetic emission of the lithosphere: Do we always adequately interpret what seemed to know? *Geofizicheskii zhurnal* 34(2), 4—19 (in Russian).
- Shuman V. N., 2014a. On predictability seismic process. *Geofizicheskii zhurnal* 36(3), 48—71 (in Russian).
- Shuman V. N., 2014b. Seismic processes and advanced monitoring systems. *Geofizicheskii zhurnal* 36(4), 50—64 (in Russian).