

О прогнозируемости активных геосистем: метастабильность и устойчивые переходы вместо аттракторов

© **В. Н. Шуман**, 2016

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 19 августа 2016 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

Розглянуто деякі деталі та особливості численних експериментальних і теоретичних досліджень з прогнозу та прогнозованості динаміки геосистем, на які не звертали достатньої уваги, але які можуть мати визначальне значення для постановки майбутніх робіт у цій галузі. В руслі ідей нелінійної динаміки просторово-часових процесів і систем обговорено нові можливості та нові підходи до їх вирішення. Ключові динамічні об'єкти такого підходу — метастабільність і стійкі переходи, причому метастабільним образам у фазовому просторі системи відповідають уже не аттрактори, а перехідні множини траєкторій. Підкреслено активну роль геосередовища та його особливих динамічних станів, які породжуються кооперативною поведінкою його елементів і підсистем. Сформульовано адекватніше, на думку автора, визначення сейсмічного процесу та можливих механізмів генерації спонтанних емісій різної природи, які пов'язані з перехідним розсіюванням, більш обґрунтованих з точки зору як їх фізичної інтерпретації, так і можливостей моделювання. На цій основі і з урахуванням загальних критеріїв, які забезпечують появу критичної динаміки та нових нелінійних динамічних режимів в активних (збуджуваних) системах, установлених в останні роки, обговорено актуальні питання діагностики та прогнозованості геосистем. Підкреслено особливу роль і вплив завад (шумів) різної природи на активні структуровані геосистеми, які допускають самоорганізовану критичну поведінку, та процесів формування ступеневих спектрів потужності. Причому, не зважаючи на широко декларовані тези 1970—1980-х років та на відміну від «странно-аттракторного» підходу, основну увагу приділено впливу шумів та флуктуацій на великомасштабну динаміку геосистем. У результаті задачу локального прогнозу в сучасній постановці можна розглядати як дослідження відгуку активного (збуджуваного) структурованого геосередовища на багаточастотні спонтанні флуктуації та зовнішні впливи. Звернено увагу на деякі особливості та суттєві фактори формування вогнищ землетрусів та еволюційних процесів, відомих як із спостережень, так і з розв'язків базових рівнянь нелінійної динаміки. Підкреслено тісний зв'язок спонтанних емісій літосфери з динамікою автоструктур і їх ансамблів. При цьому бачочно-ієрархічна неоднорідна структура літосфери визначає не лише просторові характеристики полів спонтанних емісій, а й значною мірою їх часові та енергетичні характеристики.

Ключові слова: динамічні системи, сейсмічність, спонтанні емісії, прогнозованість геосистем, сейсмoeлектромагнетизм, перехідні процеси, автоструктури, системи з шумом.

Введение. Несмотря на значительный рост сетей мониторинга за сейсмической активностью, развитие новых технологий исследования и обработки данных, увеличивающееся проникновение в сейсмологию методов нелинейной динамики сложных систем, многие ключевые вопросы прогноза и прогнозируемости геосистем оказались весьма затруднительными и все еще весьма далеки от своего разрешения. Очевидно, трудности решения проблемы связаны со сложностью исследуемого объекта — геосреды как активной динамической системы с диффузией, которая в

зависимости от условий возбуждения может проявлять свойства детерминированных, хаотических и сложных систем. Математические модели таких распределенных активных сред с конечным порогом неустойчивости весьма сложны, их общее описание не представляется возможным, а каждый новый достаточно глубоко исследованный пример таких систем, как правило, обнаруживает проявления новых типов самоорганизации. При этом нетрадиционность задач современной геодинамической теории таких систем прежде всего связана с явлениями структурообразования, превраще-

нием одних структур в другие при изменении параметров геосреды.

Очевидно, вопросы динамики и прогнозируемости таких систем слишком фундаментальны сложны и противоречивы, и слабо адаптированы к решению прикладных задач. Не удивительно, что в этой области исследований до настоящего времени продолжают активные обсуждения и дебаты, часто слабоаргументированные, акцентирующие внимание на ее частичных аспектах, нередко приобретающие весьма тоталитарные формы.

Современное состояние дел в этой отрасли исследований — всплески оптимизма и близости достижения цели, скепсис, иллюзии, безысходность или невозможность решения проблемы прогноза, особенно краткосрочного. Заметим, что с точки зрения приложений мы нуждаемся не в прогнозе вообще, а до того момента времени, когда он еще может быть актуальным. В этом контексте весьма уместно попытаться посмотреть на проблему прогноза и прогнозируемости с учетом современных позиций и достижений нелинейной динамики сложных систем, в частности неравновесных сред, для процессов структурообразования в которых характерны пространственное развитие структур (автоструктур) и хаотическая динамика ансамблей автоструктур. Другой весьма важный аспект проблемы, на который не обращалось должного внимания, — влияние шумов и флуктуаций различной природы на режимы функционирования распределенных нелинейных динамических систем. Как известно, источники шума в таких динамических системах могут индуцировать новые режимы их функционирования, которые не могли быть реализованными в его отсутствие, например, вызванные шумом автоколебания, образование более упорядоченных структур, увеличение степени когерентности и другие эффекты.

Яркий пример указанного типа поведения системы — присутствие $1/f$ шума (или фликкер-шума), усреднение которого по времени дает непредсказуемый, изменяющийся от реализации к реализации результат с разбросом, неубывающим или даже возрастающим при увеличении длительности времени усреднения. Еще один интересный аспект проблемы — статистика наиболее важных с прикладной точки зрения сильных (экстремальных) событий оказывается существенно иной, чем обычная статистика больших чисел.

Ряд важных, по мнению автора, вопросов проблемы прогнозируемости и прогноза ди-

намики геосистем рассмотрен в предыдущих публикациях [Шуман, 2014а, б, в; 2015а, б; 2016а, б]. В настоящей статье на основе и с учетом уже выполненных исследований будет продолжено рассмотрение некоторых элементов и деталей проблемы, на которые обращалось недостаточное внимание, но которые, возможно, могут определять дальнейшие направления исследований.

Внимание будет концентрироваться на более адекватных и современных представлениях о геосреде как активной (возбудимой) динамической системе с диффузией, пронизываемой потоками энергии и вещества из низов литосферы, более современной трактовки и понимания сейсмического процесса как раздела теории геодинамических систем, продукта формирования, поддержания и преобразования автоструктур или диссипативных структур. Использование этих принципов и подходов, на наш взгляд, является перспективным и привлекательным для приложений.

Изложение организовано следующим образом. Статья начинается с краткого, фрагментарного изложения состояния вопроса. Далее приводятся сведения об особенностях геосистем и их динамики, после чего рассматриваются некоторые вопросы хаоса, сейсмичности, спонтанного сейсмоэлектромагнетизма, концептуальных основ мониторинга, некоторых особенностей аттракторов систем с шумом, странно-аттракторного подхода и новой парадигмы прогноза, возможных направлений дальнейших исследований.

О состоянии вопроса. Весьма удивительно и даже парадоксально, но до сравнительно недавнего времени (середины XX в.) среди физиков отмечалась уверенность в потенциально неограниченных возможностях классической физики предсказания поведения сложных систем, располагая лишь динамическими уравнениями и начальными условиями [Кравцов, 1989]. И если допускалось существование принципиально неустранимых причин непредсказуемости, то не в характере уравнений классической физики. Однако к началу 1970-х годов, в основном благодаря классическим работам В. И. Арнольда, А. Н. Колмогорова, Э. Н. Лоренцо, Я. Г. Синая, Ф. Такенса и ряда других исследователей, произошел пересмотр этих уже устоявшихся представлений о «предсказуемой динамике». Проблема предсказуемости оказалась в центре внимания многих направлений нелинейной динамики, в частности при исследовании процессов в сильнонерав-

новесных открытых системах, пронизываемых потоками энергии и вещества. В центре ее интересов оказывается все большее число нелинейных распределенных сред, структурообразование в которых демонстрирует в широком диапазоне масштабов и параметров пространственно-временной скейлинг [Иудин, 2005]. Получило интенсивное развитие новое направление исследований — предсказуемости хаотических систем [Ахромеева и др., 2007; Лоскутов, Михайлов, 2007; Лоскутов, 2010]. Обнаружено весьма примечательное свойство хаотических динамических систем: они оказались весьма чувствительными к внешним воздействиям. Показано, что теорию сложных систем можно рассматривать в качестве общей теории самоорганизации в средах весьма различной природы. Стало очевидным, что проблема предсказуемости в общем случае тесно связана с решением задач нелинейной динамики и теории сложных систем.

Для геофизики, в частности сейсмологии, особо актуальным становится вопрос о прогнозируемости активных геосистем с делокализованными источниками энергии и прогноза конкретных сейсмических событий. Значительные усилия по его решению предприняты в последние годы математиками и физиками, стоящими на «математической» точке зрения. Однако, несмотря на заметный рост теоретических разработок и экспериментальных данных, физической теории сейсмического процесса пока нет [Кособоков, 2004; Шаповал, 2011; Гуфельд, 2013; Гуфельд, Новоселов, 2014; Родкин, 2016]. До настоящего времени продолжают бурные дискуссии по самому существу вопросов прогноза, особенно краткосрочного, и прогнозируемости реальных геосистем. При этом наименее дискуссионной здесь является необходимость новой теории. Одной феноменологии здесь явно недостаточно.

Упомянем некоторые из высказанных по этому вопросу точек зрения и начнем с часто цитируемого высказывания Чарльза Рихтера: «только дураки и шарлатаны предсказывают землетрясение». Приведем более рафинированное и изящное высказывание В. И. Кейлиса-Борока: «прогноз, не скажу, возможен, но, по крайней мере, не невозможен» [Кособоков, 2004]. О принципиальной непредсказуемости эпицентральной зоны сильнейших землетрясений утверждается в работе [Короновский, Наймарк, 2012].

«На новом материале... подтверждено понимание сейсмического процесса как фунда-

ментального следствия эволюции тектонической системы к состоянию СОК, в котором невозможен реальный прогноз динамики и катастроф» [Захаров, 2014]. «Не исключено, что точный краткосрочный прогноз вообще недостижим. Что касается долгосрочного и среднесрочного прогноза, то его нужно считать лишь оценкой возможной потенциальной опасности» [Гуфельд, Новоселов, 2014].

Исследование по прогнозу сейсмичности «...должны иметь статус фундаментальных, а не прикладных, обязанных давать надежный прогноз того, что объективно не поддается прогнозированию» [Наймарк, Захаров, 2012]. Однако столь максималистские представления о принципиальной непредсказуемости землетрясений не являются общепринятыми и, по существу, были опровергнуты [Родкин, 2016]. Так, в работе [Кособоков, 2004] положительно решается фундаментальный вопрос сейсмологии о предсказуемости сильных землетрясений.

Показано, что широкий класс сложных систем с самоорганизованной критичностью (СОК) предсказуем с помощью универсальных предвестников, а свойства прогнозируемости и масштабной инвариантности не противоречат друг другу [Шаповал, 2011].

Сошлемся еще на один пример — исследование А. А. Любушина по поиску предвестников сильных сейсмических событий как эффектов увеличения синхронизации (когерентного поведения) скалярных компонент многомерных временных рядов систем мониторинга низкочастотных микросейсм [Любушин, 2013]. Предложенный метод поиска предвестников основан на определении статистически значимого уменьшения среднего значения ширины носителя мультифrakтального спектра сингулярности (когерентности) вариаций его же параметров. Обратим внимание и на другие важные обстоятельства. Так, еще в 1970-х годах установлена фундаментальная закономерность разрушения материалов: любому полному разрушению предшествует более или менее длительный подготовительный период [Макаров, 2012]. Можно также привести тот факт, который находит все большее признание, что предшествующие сильным сейсмическим событиям явления, в основном непосредственно перед ним, существуют [Хаякава, Коровкин, 2011].

Необходимость новой физической теории сейсмичности очевидна. Однако уместно напомнить, что, как правило, ни одна крупная проблема не решалась в русле исключительно

тех идей и представлений, которые существовали при ее постановке. Кроме того, каждая новая фундаментальная теория обычно представляла не только новые возможности, но и зачастую лишала многих иллюзий и заблуждений. Однако в любом случае динамическое видение проблемы прогноза и прогнозируемости геосистем остается приоритетным, хотя в последнее время считается наиболее перспективным (или даже безальтернативным) направлением по краткосрочному прогнозу сейсмичности применение сейсмических средств, позволяющих отслеживать деформации земной поверхности и наблюдений за ионосферой [Пулинец, Узунов, 2011; Хаякава; Коровкин, 2011; Пулинец и др., 2012]. Новый известный отблеск или всплеск энтузиазма — «...несмотря на известный пессимизм, даже отрицание принципиальной возможности краткосрочного прогноза ... сегодня можно утверждать, что эта важная проблема геофизики фактически решена» [Дода и др., 2013]. И такой вывод сделан на основании некоторой эмпирической схемы прогноза, фактически не опирающейся на какие-либо конкретные свойства геосистемы и протекающие в ней процессы. Было бы ошибочным предполагать, что опыт мониторинга с использованием спутниковых технологий при всех его преимуществах открывает только радужные перспективы.

Важная особенность дистанционных систем — возможность получения геолого-геофизической информации для обширных регионов, что труднодостижимо при наземном мониторинге. Тем не менее тезис об безальтернативности спутниковых технологий, широко обсуждаемый в настоящее время многими геофизиками, не представляется бесспорным [Гуфельд, 2013; Шуман, 2016б]. Это не прогноз сейсмического события в его классическом традиционном понимании. Метод не ориентирован на получение прямых сведений о состоянии геосреды и протекающих в ней процессах. Это, скорее, прогноз и констатация особенностей временной и пространственной динамики радонового поля, запуска и развития обусловленного им процесса от поверхности земли до магнитосферы, включая такие параметры, как вертикальный профиль температуры и влажности, электронной концентрации, локальные характеристики ионосферной плазмы, потока инфракрасного излучения, конфигурацию облачного и покрова и др. [Пулинец, Узунов, 2011; Пулинец и др., 2012]. Трудности решения проблемы в этом случае очевидны:

соответствующие изменения параметров в системе литосфера—атмосфера—ионосфера достаточно малы и в ряде случаев обнаруживаются только статистически. Весьма дискуссионно и использование с этой целью сейсмоэлектромагнитных явлений, которые «...имеют несейсмическую природу и поэтому не имеют практически ничего общего с сейсмологией» [Хаякава, Коровкин, 2011]. Геология и сейсмичность здесь выступают лишь в качестве источника информации о литосфере. Однако в любом случае наземные сейсмические методы контроля останутся ведущими при диагностике глубинного строения сейсмоактивных зон и изменения их параметров, хотя предвестниковые проявления катастрофических сейсмических событий, несомненно, присущи не только сейсмичности, но и спонтанному электромагнитному и сейсмоэлектромагнитному излучению, генерируемому литосферой.

Динамические системы и нелинейно-динамический подход к изучению геосистем.

Как известно, подход, основанный на идеях, методах и принципах нелинейной динамики, в настоящее время является одним из важных, эффективных и приоритетных направлений исследований современной геофизики и сейсмологии. Динамические модели геосистем, построенные на базе обширных экспериментальных наблюдений, открыли широкие возможности для интерпретации, понимания, а в ряде случаев и предсказания динамических механизмов функционирования геосреды как открытой многомасштабной иерархически организованной диссипативной системы, через которую могут протекать большие потоки энергии и вещества. Характерные свойства геосистем — диссипативность динамики, компенсация энергопотерь за счет внешних источников, активность их отдельных элементов. В виду актуальности проблемы начнем с некоторых стандартных, ставших уже классическими определений.

Систему называют динамической, если определен выбор величин, называемых динамическими переменными, которые характеризуют мгновенное состояние, и задан закон или правило, позволяющие по начальному состоянию системы определить ее состояние в любой последующий момент времени [Лоскутов, Михайлов, 2007; Кузнецов, 2011]. Множество всевозможных состояний образует ее фазовое пространство, образованное всеми параметрами, необходимыми для описания. Фазовый портрет — это траектория развития системы,

но в пространстве ее параметров. При этом положение системы в фазовом портрете в любой конкретный момент времени задается точкой в ее фазовом пространстве.

Как известно, для описания систем с непрерывным временем обычно используются дифференциальные уравнения вида (или их системы)

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \mathbf{P}(\mathbf{u}, \lambda), \quad (1)$$

где $\mathbf{u}$ — мерный вектор состояния, $\mathbf{P}$ — нелинейный оператор, λ — параметры системы.

В соответствии с теоремой существования и единственности их решения, по заданному состоянию в некоторый момент времени можно однозначно найти состояние в последующие и предыдущие моменты времени. Системы с дискретным временем определяют обычно с помощью отображения, задающего трансформацию состояния в течение одного шага:

$$\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{g}(\mathbf{u}_n),$$

где $\mathbf{g}$ — векторная функция, $\mathbf{u}$ — вектор состояния. В этом случае фазовая траектория задается дискретной последовательностью точек.

Оба рассмотренных класса систем с непрерывным и дискретным временем тесно связаны между собой, причем переход от одних к другим осуществляется с помощью построения, известного в литературе как «сечение Пуанкаре» [Кузнецов, 2011].

Выделяют консервативные и диссипативные системы. Для первых характерно сохранение «памяти» о начальном состоянии, для других — в течение некоторого времени динамический режим становится независимым от начального состояния. Подобный подход, опирающийся на успешный опыт динамического моделирования в различных областях науки, весьма распространен. Обычно он включает в себя набор элементарных моделей, развитой технологии анализа и доказательств с целью получения информации о поведении системы «в целом». Важную роль в подобном описании играет геометрическое представление эволюции исследуемой системы в относительно малоразмерных проекциях ее фазового пространства. Поведение системы в этом случае может быть описано в терминах аттракторов, переходных состояний, устойчивости, бифуркаций и др. [Рабинович, Мюезинолу, 2010].

Одна из основных задач нелинейно-динамического подхода — выработка на осно-

ве экспериментальных данных адекватных динамических образов ключевых явлений и процессов, происходящих в исследуемой системе, построение на их основе базовых моделей и изучение динамически этих моделей. Выделяют обычно несколько этапов такого изучения [Некоркин, 2008]:

- обнаружение структурно-устойчивых систем и явлений, не изменяющих свойств при относительно малых вариациях их параметров;

- детальный анализ структуры фазового пространства (пространства состояний) системы с целью диагностики всех возможных типов поведения системы;

- исследование тенденций развития (эволюции) процессов при изменении ее параметров.

Важно, что приведенные определения не исключают возможности хаотического поведения системы, когда зависимость наблюдаемых величин от времени выглядит как случайный процесс. Как известно, хаос оказался весьма типичным явлением в системах различной природы. Напомним, если говорится о хаосе, обычно подразумевается, что изменение во времени состояния системы является случайным (его нельзя однозначно предсказать) и невоспроизводимым (процесс нельзя повторить). Для того чтобы проводить различие между регулярной и хаотической динамикой на количественном уровне, обычно используют показатели Ляпунова [Лоскутов, Михайлов, 2007; Лоскутов, 2010; Кузнецов, 2011]. В пространстве состояний систем с диссипацией хаос ассоциируется с присутствием странного аттрактора, обладающего фрактальной структурой, причем наличие в спектре показателей Ляпунова (спектр показателей Ляпунова аттрактора понимается как спектр показателей для типичной траектории на аттракторе) хотя бы одного положительного показателя свидетельствует о том, что аттрактор — хаотический, а по известному спектру этих показателей можно оценить фрактальную размерность аттрактора [Лоскутов, 2010; Кузнецов, 2011]. Установлено, что поведение системы со странным аттрактором характеризуется сочетанием глобального сжатия фазового объема системы с локальной неустойчивостью фазовых траекторий. При этом наличие источников шума в нелинейных динамических системах может индуцировать новые режимы их функционирования, которые не могут быть реализованы в его отсутствие.

Согласно А. Ю. Лоскутову [Лоскутов, 2010], аналитических результатов, касающихся суще-

ствования странных аттракторов, относительно мало, а само это понятие приобрело некоторый собирательный контекст — этим хотя бы подчеркнуть хаотичность изучаемой системы: «этот термин является скорее парадигмой, чем характеристикой какого-либо математического объекта». И более того, для большинства сложных систем, с которыми обычно имеют дело в приложениях, далеко не всегда удается вывести какие-либо уравнения, исходя из физических принципов, и, соответственно, их невозможно исследовать в рамках модели (1).

Исследования начали смещаться в сторону изучения активных систем, в которых присутствуют потоки энергии от внешнего источника и диссипируемых ими. Именно благодаря этим потокам системы становятся активными (возбуждаемыми), т. е. приобретают способность к автономному образованию структур [Лоскутов, Михайлов, 2007]. Такие системы демонстрируют удивительное разнообразие их динамического поведения, и общей их теории не существует. Аналитические возможности исследования таких структур (автоструктур) и их ансамблей опираются, в основном, на решение приближенных или модельных уравнений. Численные же эксперименты весьма затруднительны и трудоемки.

Как известно, исследование высокоорганизованных пространственно-временных структур в средах с диссипацией, далеких от термодинамического равновесия, является одной из центральных проблем современной геодинамики. Существенно, что эволюция процессов и структур в подобных системах не может осуществляться вне рамок автоволновых процессов, являющихся пространственно-временными структурами, причем наличие пространственно-временной структуры — их фундаментальное и всеобщее свойство [Эбеллинг, 1979].

Выделяют два типа эволюционных процессов:

- временная эволюция к неравновесному стационарному состоянию;
- эволюция через последовательность таких состояний [Рабинович, Мюезинолу, 2010].

Особый круг возникающих вопросов — воздействие шумов различной природы на такие системы, в частности на формирование и разрушение пространственно-временных структур (автоструктур), и вызванной шумом неустойчивости, влияние шума на мультистабильность. Важно, что различие в реакциях системы на внешний шум может служить

фактором, инструментом их диагностики, в частности режима функционирования — автоколебательного или возбуждаемого, а также типа активной среды — возбуждаемой, автоколебательной или бистабильной.

Таким образом, нетрадиционность задач современной теории неравновесных сред связана, прежде всего, с явлениями структурообразования, формирования автоструктур, их превращений одних в другие при изменении параметров геосреды — бифуркации пространственных образов [Гапонов-Грехов, Рабинович, 1987а, б]. Такая постановка задачи выглядит почти безнадежной: «... метастабильным образом в фазовом пространстве динамической модели уже не аттракторы, а переходные множества траекторий, внутри которых изображающая точка проводит основное время». Да и сами автоструктуры — весьма нетривиальный объект исследований. Для их описания необходимы новые идеи и подходы [Рабинович, Мюезинолу, 2010], в частности разработки новых моделей, методов и адекватных образов и понятий, общих для неравновесных сред произвольной природы. При этом, очевидно, в открытых системах можно выделить два класса эволюционных процессов: временная эволюция к неравновесному квазистационарному состоянию и эволюция через последовательность таких состояний. Важно, что определяющими признаками неравновесного критического поведения систем, далеких от термодинамического равновесия, являются критическое замедление времен релаксации системы и аномально большие времена корреляции различных состояний системы [Руманов, 2013]. Обычно эти особенности ведут к реализации динамического скейлингового поведения системы. Отсюда следует вывод о возможности существования универсальных алгоритмов прогноза эволюции, кризисов и катастроф для систем весьма различной природы.

Хаос, сейсмичность и прогнозируемость.

Как уже упоминалось, кластерная сущность организации геосреды обуславливает системный анализ ее подсистем и эволюционирующих объектов (автоструктур и их ансамблей), которые в зависимости от иерархического уровня своей организации проявляют свойства детерминированных, стохастических и хаотических сложных систем. В ней существуют комплексы нелинейных взаимодействий между физическими полями, структурами и подсистемами. На эту открытую нелинейную систему и происходящие в ней процессы действуют шумы различной природы и цветности, в том числе

стохастические, потоки энергии и вещества, способные проявляться на определенных (соответствующих их масштабу) иерархических уровнях организации.

Детерминированный или динамический хаос — типичное явление, присущее исключительно нелинейным системам с размерностью $N > 3$. Для некоторых классов диссипативных систем получены качественные критерии хаотичности их динамики, в частности свойство гиперболичности, означающее наличие в фазовом пространстве странного аттрактора [Кузнецов, 2011]. Была введена в рассмотрение некая особая разновидность таких аттракторов — однородно-гиперболические аттракторы, обладающие свойством структурной устойчивости, т. е. устройство фазового пространства и динамика системы не чувствительны к малым возмущениям параметров. Это привело к определению хаотического поведения системы через ее чувствительную зависимость от начальных условий. При этом мерой хаотичности могут служить показатели Ляпунова: если имеются положительные показатели, то поведение динамической системы будет хаотическим.

Хаотическая природа динамики системы на однородно, гиперболических аттракторах получила безупречное математическое обоснование. Однако по мере накопления конкретных экспериментальных примеров стало ясно, что, вообще говоря, эта теория зачастую не имеет прямого отношения к реальным системам [Кузнецов, 2011]. Были предприняты усилия на разработку различных обобщений, применимых к более широкому классу реальных систем. В частности, введены в рассмотрение понятия квазигиперболических аттракторов, неоднородно-гиперболических аттракторов, квазиаттракторов (см. [Кузнецов, 2011] и приведенные там ссылки).

Существенно, что для динамического хаоса существует некоторый характерный временной масштаб («горизонт предсказуемости или прогноза»), логарифмически зависящий от неточности задания начальных условий, за пределами которого предсказание поведения состояний системы становится невозможным. И этот «горизонт» весьма ограничен. Заметим, что известная теорема Такенса подготовила соответствующую почву для построения алгоритмов предсказания хаотических процессов на основании использования информации о динамической природе наблюдаемых временных рядов (сигналов), генерируемых системой [Лоскутов, 2010]. В настоящее время термин

«странный аттрактор» приобрел некий собирательный смысл и является скорее парадигмой, чем характеристикой какого-либо математического объекта: существуют странные хаотические аттракторы, которые имеют фрактальную структуру, но при этом система не обладает хаосом ни в каком смысле [Лоскутов, 2010]. Понятно, что широкое использование понятия «странный аттрактор» далеко не всегда оказывается безупречным и оправданным. По этой причине, согласно А. Ю. Лоскутову [Лоскутов, 2010], если структура аттрактора хаотической системы неизвестна, что является обычным при экспериментальных исследованиях, то правильнее называть такие аттракторы хаотическими, акцентируя внимание на сложности траекторий системы.

Различия между детерминированным и истинным (белым шумом), т. е. регулярной и хаотической динамикой, на количественном уровне могут быть обнаружены на основании некоторых параметров или характеристик. В частности, для этого используют показатели Ляпунова [Лоскутов, 2010].

Пусть $x(t)$ — типичная фазовая траектория системы, а $x_1(t)$ — близкая к ней траектория $x_1(t) = x(t) + \xi(t)$. Тогда, вводя в рассмотрение функцию

$$x(\xi(0)) = \frac{1}{t} \int_0^t \frac{|\xi(t)|}{|\xi(0)|} dt,$$

которая определена на векторах начального смещения $\xi(0)$ таких, что $|\xi(0)| = \xi$, где $\xi \rightarrow 0$, получим ряд ее значений $\{\lambda_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, в зависимости от направления вектора $\xi(0)$, которые называются ляпуновским спектром. Если имеются положительные показатели, то поведение системы будет хаотическим. При этом значение времени предсказуемости системы может быть оценено по следующей упрощенной формуле:

$$T_\lambda \sim \lambda_{\max}^{-1},$$

где $\lambda_{\max}$ — максимальный показатель Ляпунова. Таким образом, в принципиальном смысле на основании только экспериментальных данных можно оценить горизонт прогноза рассматриваемого процесса. Заметим, что спектр шумов в этом случае гораздо более равномерный и однородный, а реализация беспорядочна, в то время как спектр детерминированных хаотических движений может содержать пики на некоторых частотах, а реализация — участки, похожие на периодичности.

Заметим также, что детерминированный хаос — явление, присущее исключительно нелинейным системам. Ограниченность строгих хаотических результатов применительно к этим системам весьма затрудняет понимание этого универсального явления и, возможно, зачастую ведет к ошибочным интерпретациям экспериментальных данных.

Таким образом, в случае детерминированного хаоса предсказывать эволюцию системы оказывается возможным лишь на ограниченном временном интервале, а на больших временных ее поведение приходится описывать уже статистическими методами.

Обратим внимание на конструктивный потенциал хаоса. В частности, теория хаоса утверждает, что слабые изменения в системе могут порождать аномально большие следствия, а одной из центральных ее (теории) концепций является невозможность точного предсказания состояния системы. Но в то же время теория хаоса утверждает, что способ реализации таких сложных непредсказуемых нелинейных систем находит свое отражение в структуре странных аттракторов или во фрактальных параметрах. При этом вопрос о детерминированности системы, генерирующей нерегулярную реализацию процесса, является определяющим при решении задач идентификации и прогноза. Эти задачи для распределенных систем, очевидно, не могут быть решены без должного понимания механизмов появления пространственно-временного хаоса (хаотического режима, при котором корреляции убывают в пространстве и во времени) и типичных бифуркаций, генерирующих нерегулярное поведение. Однако не существует какой-либо общепринятой и последовательной теории его возникновения. В теоретическом плане эту проблему можно свести к проблеме динамического хаоса в нелинейных системах уравнений в частных производных. Получить их общее решение, как правило, не представляется возможным. При численном же моделировании остаются скрытыми причины, определяющие характер процесса, и для установления его закономерностей требуется большое число расчетов и больших затрат времени из-за наличия быстро осциллирующих функций. Однако из условия длительного существования литосферы следует слабость хаотических движений в ней. Это существенно изменяет ситуацию: близкорасположенные траектории в этой пространственно-структурированной многомасштабной открытой системе с нелинейной

динамикой никогда далеко не удаляются друг от друга. В ней, в отличие от полностью хаотических систем, характеризующихся «горизонтом прогноза», такая характеристика отсутствует и поэтому, в принципе, она допускает долгосрочный прогноз.

Далее, в рамках определения сейсмичности как распределения вероятностей сейсмической активности на фазовом пространстве сейсмотектонической системы или статистического ансамбля состояний, проходимых такой геосистемой за некоторый достаточно длительный интервал времени и в русле ее адекватности модели детерминированного (динамического) хаоса, коснемся некоторых вопросов прогноза вероятностей сильных событий.

Как известно, динамический хаос, подобно случайному процессу (а в силу ряда причин, прежде всего, отсутствием соответствующей физической теории, мы вынуждены относиться к сейсмичности как к случайному процессу), требует статистического описания [Герцик, 2008]. В его основе лежит фундаментальная теорема теории вероятностей — так называемая центральная предельная теорема.

Как известно, она содержит и объединяет совокупность теорем с различной степенью общности и применимости, призванных дать ответ на вопрос о том, как распределена сумма независимых случайных величин. Если распределение такой суммы стремится к нормальному (гауссовому) распределению, то при описании статистических характеристик процесса особая роль принадлежит корреляционной теории случайных процессов, в которой рассматриваются только одномерные и двумерные распределения.

Обычно корреляционные функции записывают в симметризованном виде, в частности для компонент сейсмoeлектромагнитных полей $\mathbf{B}$:

$$\gamma_{ij}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; t - t') = \frac{1}{2} \left\langle B_i(\mathbf{r}, t) B_j(\mathbf{r}', t') + B_j(\mathbf{r}', t') B_i(\mathbf{r}, t) \right\rangle, \quad (2)$$

где угловые скобки означают усреднение по ансамблю.

При этом фурье-образ корреляционной функции в соответствии с теоремой Винера—Хинчина представляет собой спектральную плотность флуктуаций

$$\gamma_{ij}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \gamma_{ij}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \tau) e^{i\omega\tau} d\tau. \quad (3)$$

В рамках такой общей математической модели предприняты попытки реализации пространственно-временного прогноза вероятностей сейсмических событий. При этом прогнозируются лишь текущие вероятности событий, а не сами события. Причем подчеркивается необходимость предвестников (продикторов), обладающих физическим смыслом, которые могут быть получены на основании представлений, пусть и приближенных, о физической природе сейсмичности [Герцик, 2008]. В рассматриваемом контексте кажется более естественной точка зрения, согласно которой сейсмический процесс является отражением как внутренних системных флуктуаций, так и внешних воздействий.

Как известно, реакция случайной системы на слабое внешнее воздействие, согласно флуктуационно-диссипативной теореме, определяется корреляционной функцией флуктуаций невозмущенной системы, доказательства которой основаны на предположениях, которые сводят систему к гауссовой стационарной. Однако реальные системы, как правило, структурированы, и по этой причине среднестатистическое среднее не обеспечивает достаточной количественной оценки реакции системы на такое воздействие. Структурированная система реагирует на внешнее воздействие более сложным образом [Рузмайкин, 2014]. Ее среднее состояние изменяется слабо, но сильно возрастает число экстремальных событий. Статистика последних обнаруживает весьма необычные свойства, в частности способность приходить группами, т. е. образовывать кластеры.

Статистическую основу для определения характеристик экстремальных событий представляет теорема Фишера—Типпета—Гнеденко (ФТГ) [Рузмайкин, 2014]. Трудность, однако, состоит в том, что экстремальные события (к примеру, форшоки, майншоки и афтершоки), как правило, не являются независимыми, обычно сгруппированы в кластеры, а сама ФТГ-теорема ориентирована на распределение интенсивности экстремальных событий и не отвечает на вопрос, какова частота их появлений. В итоге с практической точки зрения вопрос о режиме повторяемости таких событий, по-существу, остается открытым. В то же время экспериментально установлен эффект «загиба вниз» графика повторяемости в области редких экстремально сильных событий, которые, как оказалось, происходят значительно чаще, чем это следует из закона Гутенберга—

Рихтера. Известны попытки моделирования этого эффекта и возможностей реализации аномально сильных характеристических событий [Родкин и др., 2015].

Возможность быстрого изменения состояния геосистемы и реализация степенных законов (закона Гутенберга—Рихтера и законов, описывающих интенсивность потоков форшоков) позволяют объединить критические явления в геосистеме с сейсмическим процессом [Родкин, 2016]. Тогда, интерпретируя землетрясение как локальный фазовый переход между состояниями консолидации и разрушения геосреды, можно попытаться использовать некоторые результаты теории критических явлений применительно к сейсмичности. Такой подход, базирующийся на моделях интерпретации сейсмического события как критического явления и модели разрушения С. Н. Журкова, позволил привлечь к его изучению некоторые общие положения теории катастроф и неравновесной термодинамики. При этом в геофизической литературе отмечается определенное очарование теорией катастроф, в которой изучаются особенности так называемых гладких отображений и бифуркаций динамических систем. Причем исследуются главным образом сосредоточенные системы, описываемые набором обыкновенных дифференциальных уравнений [Лоскутов, 2010; Гульельми, 2015]:

$$\frac{d\psi}{dt} = v(\psi, a), \quad (4)$$

где $\psi(t = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n\})$ — совокупность динамических переменных, $v = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ — векторная функция заданной гладкости, определенная в некоторой области $M \subset R^n$, $v: M \rightarrow R$, a — набор (или совокупность) параметров, M — фазовое пространство системы (4). Геометрически систему (4) можно интерпретировать в качестве некоторого векторного поля, которое каждой точке $\psi \in M$ ставит в соответствие вектор v . Система (4) удовлетворяет основной теореме локального существования и единственности решения для каждого заданного начального состояния $\psi(0) = \psi_0$ и любого гладкого векторного поля v имеется единственная фазовая кривая (траектория). Катастрофа происходит в форме резкого изменения ψ при плавном изменении параметров a . В случае $\text{div } v < 0$ (для диссипативных систем) при $t \rightarrow \infty$ все фазовые траектории будут сходиться к некоторому компактному множеству в фазовом объеме, которое обычно и называется аттрактором динамической

системы. Ситуация, однако, существенно изменяется в случае описания распределенных нелинейных сред, которые обычно в значительной степени структурированы.

Заметим, что для большинства нелинейных систем обыкновенных дифференциальных уравнений арсенал средств их анализа весьма ограничен и почти ничего не удастся сделать, кроме формулировки некоторых утверждений общего характера. В этом случае становится важным отыскание стационарных решений (неподвижных точек) и исследование поведения решений этой нелинейной системы уравнений вблизи этих точек. Фундаментальная теорема Гробмана—Хартмана [Гукенхеймер, Холмс, 2002] в теории динамических систем определяет условие, когда поведение этой системы может быть сведено к соответствующей задаче для линеаризованной системы.

Таким образом, описание переходов в системах (в частности, приближающегося изменения состояния системы), зависящих от нескольких параметров, удастся дать лишь для сравнительно простого и ограниченного класса объектов, который и рассматривает теория катастроф. Весьма важно, что эволюция процессов, объектов и подсистем в литосфере, в которой источники энергии распределены по всей среде, как известно, не может быть реализована вне рамок автоволновых процессов, являющихся пространственно-временными структурами. Изучение явлений в таких средах, часто называемых активными, — весьма сложная задача. Общей теории активных сред не существует, а каждый новый достаточно проработанный пример активной среды, как правило, дает примеры новых типов динамики и самоорганизации, динамических режимов и бифуркаций. Тем не менее установлено, что развитие катастрофических событий в таких системах оказывается возможным лишь при согласованном поведении различных частей, объектов или подсистем.

Как известно, при описании возникновения и эволюции пространственно-временных структур в нелинейных средах в последние десятилетия обозначился значительный интерес к многокомпонентным системам уравнений типа «реакция—диффузия»:

$$U_t = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\mathbf{u}) \frac{\partial u}{\partial x} \right) + F(\mathbf{u}), \quad (5)$$

где $\mathbf{u}$ — вектор состояния элементарного объема возбудимой среды, $F(\mathbf{u})$ — векторная функция, $D(\mathbf{u})$ — матрица диффузии [Васильев и др.,

1987]. При этом для описания возникновения структур функция $F(\mathbf{u})$ должна быть нелинейной. Сложность состоит в том, что в общем случае эти системы имеют пространственно-локализованные, неподвижные сложнодвижущиеся решения. Математическая сторона проблемы весьма сложна: как правило, нелинейные уравнения или их системы имеют больше, чем один тип решений, и на передний план здесь обычно выходят качественные методы исследований.

Спонтанный сейсмoeлектромагнетизм и переходные процессы. Актуальная задача современной геодинамики и прогноза — поиск методов диагностики типа исследуемой геосистемы, обнаружение эффектов регулярного и шумового воздействия на эту активную (возбудимую) геосистему, которые бы позволили диагностировать ее динамику и прогнозировать ее эволюцию на основе экспериментальных данных. Как уже неоднократно подчеркивалось, сложность использования с этой целью стандартных подходов состоит, вообще говоря, в том, что аттракторы, странные аттракторы, другие особенности пространства состояний системы, в том числе и более сложные, в случае многомерного фазового пространства как «седло—фокус», сепаратрисные инвариантные многообразия и другие весьма экзотические математические объекты, которые позволяют характеризовать возможные типы ее поведения, в реальности, на практике, оказываются ненаблюдаемыми [Руманов, 2013]. Кроме того, мнение о том, что все представляющие интерес геосистемы со временем неизбежно переходят в состояния, описываемые аттракторами, вообще говоря, закрывают или существенно ограничивают возможности моделирования сложных переходных состояний геосреды, поскольку они опираются на требования о стационарности и сбалансированности энергомассопотоков, пронизывающих ее, и симметрии связей между ее элементами и подсистемами [Зеленый, Милованов, 2004]. С этой точки зрения ныне весьма популярная парадигма современной нелинейной динамики — парадигма СОК, также не является универсальным (в силу ее сингулярного характера) подходом к решению проблемы. В то же время нелинейная динамика сложных систем предоставила такие универсальные признаки приближающегося сильного события, как аномальный рост флуктуаций и так называемое критическое замедление (эффект резонанса на нулевой частоте), удлинение шкалы времен

релаксации, формирования зон «затишья», эффекты синхронизации и формирования диссипативных структур — цугов медленных деформационных фронтов и ряд других эффектов и явлений, которые могут быть обнаружены экспериментально путем прямых измерений. При этом спонтанные эмиссии различной физической природы литосферного происхождения, являющиеся непосредственным результатом и отражением собственной переходной активности геосреды, спектр которых отражает стадию этой эволюции, обладающие характерным поведением при приближении к катастрофе и выходе из нее, неизбежно оказываются в центре внимания мониторинга и выбора физически обоснованных параметров слежения.

На передний план выходят вопросы синтеза геоэлектромагнетизма, спонтанного сейсмоэлектромагнетизма и нелинейной динамики активных распределенных систем с диссипацией, теории переходов пространственных образов и обусловленных ими процессов генерации спонтанных эмиссий литосферного происхождения, формирования концептуальных основ мониторинга, прогноза и прогнозируемости геосистем. При таком подходе мониторинг и прогноз оказываются в статусе проблем физики. Некоторым избранным ее аспектам посвящены предыдущие публикации автора [Шуман, 2014б,в; 2015б].

Аттрактор системы с шумом и новая парадигма прогноза. Как уже отмечалось, имеются фундаментальные основания для физического рассмотрения литосферы как пространственно структурированной, многомасштабной открытой системы с нелинейной динамикой. В то же время она не является самодостаточной. Можно также утверждать, что помимо внутренних системных флуктуаций она постоянно подвергается внешним периодическим и случайным воздействиям. Очевидно, в этом случае поведение геосистемы является случайным, и мы имеем дело со стохастическим или «зашумленным» аттрактором, границы которого в фазовом пространстве строго не определены [Анищенко и др., 2010].

Как известно, к классу случайных динамических систем относят системы, задаваемые векторным дифференциальным уравнением, правая часть которого зависит от некоторого случайного, возможно многокомпонентного воздействия $\xi(t)$:

$$\frac{dx}{dt} = F(x, \xi(t), \alpha), \quad x; \xi(t) \in R^N.$$

В настоящее время термин «странный аттрактор» приобрел некий собирательный смысл — его использование означает хаотичность изучаемой системы. Аналитических же результатов, касающихся их существования, относительно мало [Лоскутов, 2010].

Ввиду сложности описания хаотических систем при их изучении, особенно экспериментальном, обычно ограничиваются обработкой регистрируемых сигналов, генерируемых системой, хотя это и налагает определенные ограничения на возможности их реконструкции. Идея состоит в том, что геометрическую картину структуры странного аттрактора можно получить на основе лишь скалярного временного ряда — массива из N чисел, представляющих собой значения некоторой динамической переменной $x(t)$, зарегистрированной с постоянным шагом τ по времени. Обычно такой сигнал и, соответственно, временной ряд называется наблюдаемым, а метод исследования — реконструкцией динамических систем. Впервые этот метод математически обоснован Ф. Такенсом [Лоскутов, 2010].

Заметим, что в условиях отсутствия внешнего шума фазовая траектория будет принадлежать, в зависимости от начальных условий, тому или иному аттрактору. Ситуация кардинально изменяется при его наличии, что ведет к случайным переключениям между соответствующими аттракторами, статистика которых будет определяться свойствами шума и динамической системы [Анищенко и др., 1999]. И в этом проблема, поскольку литосфера не является самодостаточной системой.

Яркий пример особой роли шума в нелинейных системах — эффект стохастического резонанса, под которым понимают группу явлений, при которых отклик нелинейной системы на слабый внешний сигнал заметно усиливается с ростом интенсивности шума в системе [Анищенко и др., 1999]. При этом существует некий оптимальный уровень интенсивности шума, при котором периодическая компонента сигнала усиливается максимально. Следовательно, шум может контролировать один из характерных временных масштабов в системе. И что не менее важно, стохастический резонанс может выступать в качестве фундаментального порогового эффекта в случае, когда сумма регулярной (периодической) и шумовой компонент внешнего воздействия достигает и пересекает некий заданный порог возбудимой системы C_p , а именно: $[B \sin \omega t + \xi(t)] \geq C_p$.

При отсутствии шума амплитуда сигнала V недостаточна для достижения им пересечения порога возбудимости, а с его добавлением преодоление порога становится возможным и происходит случайным образом (триггерный эффект), реализуется кризис. Важный нелинейный эффект, сопровождающий эффект стохастического резонанса, — синхронизация стохастических систем как внешняя, так и взаимная [Анищенко и др., 1999]. Заметим, что достаточно шума любой интенсивности, чтобы в ансамбле подсистем анализируемой системы наблюдался эффект стохастического резонанса.

Один из важнейших нелинейных эффектов, сопутствующих стохастическому резонансу, — синхронизация стохастических систем, не имеющих собственных периодических составляющих во временных реализациях процесса [Анищенко и др., 1999]. При этом, если принять традиционную точку зрения, разделяющую флуктуации, генерируемые системой, и внешние воздействия, возможны эффекты как внешней, так и внутренней стохастической синхронизации.

Очевидно, стохастическая динамика геосистем может быть ассоциирована с особенностями энергомассопотока из низов литосферы и внешними воздействиями. При этом синхронизация, как известно, является одним из возможных механизмов самоорганизации в нелинейных системах. При этом одно из главных достижений теории хаотических динамических систем заключается в том, что, исследуя временные ряды наблюдаемых, всегда можно отличить случайное стохастическое поведение системы от детерминированного хаоса, определить горизонт прогноза и в отдельных случаях предсказать дальнейшую эволюцию системы [Лоскутов, 2010].

Разумеется, в системах с хаосом глобальный прогноз невозможен. В то же время оказывается возможным новое направление или концепция локального прогноза, основанная в общем случае на анализе динамики геосистем, возбуждаемых одновременно неким сигналом различной структуры и внешним или внутренним, произведенным самой системой, шумом заданной статистики. Этот шум в реальной системе, вообще говоря, не является белым и его статистика обычно неизвестна. Однако при приближении к точке бифуркации корреляционное время пульсаций заведомо превышает корреляционное время шума и поэтому любой шум выглядит как белый (δ -коррелированный).

Нарастание низкочастотных мягких мод при приближении к точке бифуркации стационарного режима сложной системы является универсальным свойством. Формируется максимум, точнее, резонанс на нулевой частоте [Руманов, 2013].

В более расширенной постановке, очевидно, задача локального прогноза может быть сформулирована как задача исследования отклика конкретной геосистемы на многочастотные спонтанные, генерируемые системой, внешние шумы и сигналы (воздействия) различной (в том числе периодической) структуры. Однако в такой постановке она сопряжена с постановкой как активного, так и пассивного мониторинга [Шуман, 2014в; 2015а, б].

Резонанс на нулевой частоте и фликкер-шум. Как уже упоминалось, именно структура шума может дать принципиально новые возможности диагностики динамики и строения геосистем. В частности, критерием близости стационарного режима активной системы, диссипативные потери в которой компенсируются потоками энергии извне, является резкий рост ее восприимчивости и, соответственно, нарастание низкочастотных мод в спектре ее шумов (формируется резонанс на нулевой частоте) [Руманов, 2013].

Восприимчивость стационарного режима, далекого от равновесия, определяется отношением амплитуд изменения в системе, подверженной малой синусоидальной добавке к постоянному воздействию, и воздействия. При приближении параметров системы к точке бифуркации происходит рост восприимчивости, преимущественно ее низкочастотной части из-за роста времени релаксации. Формируется резонанс на нулевой частоте [Руманов, 2013]. Сложность, однако, состоит в том, что в качестве неотъемлемой особенности систем, находящихся вдали от термодинамического равновесия, проявляются флуктуации, спектр мощности которых расходится на низких частотах по степенному закону $1/f^\beta$. Это явление получило название фликкер-шума [Бочков, Кузовлев, 1983, 2013; Коган, 1985; Кузовлев, 2015]. Именно вездесущность $1/f$ -шума оказала решающее влияние на введение Баком, Тангом и Визенфельдом концепции СОК [Bak et al., 1987]. Однако, несмотря на усилия теоретиков, общей теории, охватывающей все расходимости спектра типа $1/f^\beta$, обнаруживаемые экспериментально в различных распределенных системах, в том числе и геосистемах, нет. Теория $1/f$ -шума сильно

осложнена тем, что он имеет статистику, чуждую закону больших чисел. Предполагается обычно, что $1/f$ -шум или фликкер-шум имеет динамическую природу и представляет собой пространственно-временную когерентную структуру. Он рассматривается как результат процессов, протекающих в системах, состоящих из большого числа элементов и подсистем, способных поглощать, накапливать и высвобождать энергию. Существует точка зрения, что перемежаемость как непрерывный переход от регулярной динамики к хаотической позволяет дать универсальное объяснение его происхождения в нелинейных системах.

Другой подход к решению проблемы фликкер-шума связывают со стохастическими процессами, характерными для автоколебательных систем [Бочков, Кузовлев, 1983]. С формальной точки зрения описание фликкер-шума оказывается близким к описанию «режимов с обострением», характерным для решений многих нелинейных уравнений второго порядка или их систем параболического типа. Согласно Ю. Климонтовичу [Климонтович, 2002] предложена так называемая диффузионная теория фликкер-шума.

Оставляя за рамками данного рассмотрения другие точки зрения на проблему $1/f$ -шума, заметим лишь, что чисто стохастическое устройство мира (без $1/f$ -шума), при котором все может быть усреднено, было бы весьма обедненным и, возможно, унылым. Но как отличить фликкер-шум, постоянно присутствующий в реальных системах, от низкочастотного максимума шумов на низких частотах, связанного с ростом восприимчивости системы при приближении системы к моменту бифуркации? Согласно публикации [Руманов, 2013], этот максимум исчезает при удалении параметров системы от точки бифуркации.

В теоретическом плане связь спектральной плотности флуктуаций в системе с их диссипативными свойствами задается известной флуктационно-диссипативной теоремой физики. Смысл в том, что механизм любой диссипации является одновременно и механизмом рождения флуктуаций [Кадомцев, 1994; Бочков, Кузовлев, 2013].

На практике обычно разделяют быстрые флуктуации (белый шум ($P(f) \sim f^0$)) и низкочастотные, чьи спектры мощности $P(f)$ соответствуют степенной функции: розовый или фликкер-шум ($P(f) \sim f^{-1}$), коричневый ($P(f) \sim f^{-2}$) и черный шум ($P(f) \sim f^{-3}$). Цвет шума на низких частотах рассматривается в качестве индикатора

близости системы к состоянию СОК или степени ее «предельности»: преобладание розовых тонов (оттенков) указывает на пребывание системы в предельном неравновесном (квази) стационарном состоянии, соответствующим СОК [Зеленый, Милованов, 2004].

Очевидно, исследование низкочастотных спектров флуктуаций и шумов в природных геосистемах — одна из актуальных ближайших задач современной сейсмологии. В частности, исследование цветности шумов в спектре спонтанных флуктуаций — сейсмических, сейсмоакустических и электромагнитных — могло бы расширить представления о процессах в земной коре.

Реально $1/f$ -шум, как правило, достаточно слаб, однако он может возрастать в неоднородных (неупорядоченных) средах, существенно превышать белый на низких частотах спектра и оказаться в этом случае определяющим.

О парадоксе формирования очаговых зон.

В последние годы экспериментально обнаружен ряд существенных особенностей в процессах подготовки и реализации сейсмических событий, традиционно трактуемых в рамках накопления и последующей релаксации в земной коре высоких тектонических напряжений. В частности, по итогам тектонофизической реконструкции распределения напряжений в ряде сейсмоактивных регионов установлено, что большая плотность очагов сейсмических событий, в том числе и особо сильных, не совпадает с областями максимальных уровней напряжений, а располагается в большинстве случаев в областях их умеренных значений, соседствующих с зонами больших градиентов этих напряжений [Гуфельд, 2007; Ребецкий, 2007; Родкин и др., 2009; Пантелеев и др., 2013; Гуфельд, Новоселов, 2014 и др.]. При этом именно области градиента напряжений связывались с областями метастабильного состояния, а его (градиента) наличие является определяющим фактором крупномасштабного хрупкого разрушения [Ребецкий, 2007].

Очевидно, в рамках классических представлений механики разрушения, согласно которым разрушение в твердом теле происходит в условиях достижения максимальных (предельных) нагрузок, переход к крупномасштабному разрыву происходит лишь при достижении критической плотности трещин. Решение проблемы виделось, с одной стороны, в особой блоковой структуре литосферы, в которой происходит воспроизводство структур разрушения и их последующее новое разрушение в гранич-

ных структурах [Гуфельд и др., 2011], с другой — в рамках смены старой парадигмы описания пластической деформации и разрушения твердых тел на новую концепцию многоуровневого описания деформируемого твердого тела как нелинейной иерархически организованной системы. В ней также подчеркивается определяющая роль дефектов среды того или иного масштабного уровня как физических носителей механизмов неупругого деформирования и разрушения [Панин и др., 2012; Макаров, 2012]. В русле этих идей предпринимались попытки построения модели подготовки потенциальных очагов сильных сейсмических событий как результата и итога эволюции дефектов геосреды на различных масштабных уровнях [Пантелеев и др., 2013]. Тем не менее, ряд важных проблем многоуровневой самоорганизации и учета нелинейности в иерархически организованной блоковой среде все еще ждут своего решения, в частности физики разрушения и формирования, прочности и пластичности, физики фазовых превращений и др.

Одно из распространенных объяснений малости сейсмогенных напряжений (или даже отсутствия проблемы накопления предельных напряжений вообще) основывается на связи сейсмичности с развитием реакций дегидратации горных пород, процессами твердотельных превращений вещества тектоносферы [Родкин и др., 2009], или с водородной дегазацией и процессами взаимодействия восходящих потоков водорода и гелия с ее твердой фазой, контролирующей основные параметры структуры блоков и сейсмический процесс в межблоковых структурах [Гуфельд и др., 2011]. В этой связи на передний план выходят работы по изучению так называемого «барьерного эффекта» дегазации, процессов разгрузки среды природными газами, расслоенности слабонагруженного поверхностного слоя земной коры, процессов в граничных межблоковых структурах, позволяющих с единых позиций подойти к истолкованию процессов подготовки очаговых зон крупных сейсмических событий и природы микросейсмического шума [Гуфельд, 2013; Гуфельд и др., 2011]. При этом эксперимент определенно демонстрирует влияние неоднородностей и структурных факторов литосферы, причем учет многомасштабной иерархической природы процессов разрушения становится критически важным. Обратим внимание на попытки формализации результатов наблюдений, предпринятых на основе введения представлений о спектре дефектов материала среды как

потенциальных очагов разрушения, характеризующихся различным уровнем напряжений, необходимых для их активации [Каннель и др., 2007]. Ключевой элемент такого подхода — формирование волн разрушения (сетки трещин, инициируемых под действием приложенных напряжений). Волна разрушения является примером самоподдерживающегося разрушения при сжатии. Их формирование является одним из важных механизмов катастрофической потери прочности твердых хрупких материалов, слагающих земную кору, и представляет собой пример нелокальной реакции среды на нагрузку [Каннель и др., 2007]. Эти волны формируются при напряжениях сжатия выше некоторого порога (порога разрушения). Весьма любопытно, что в волне разрушения происходит релаксация сдвиговых напряжений, в то время как трещины могут образовываться в беспористой среде только под действием растягивающих напряжений. Но, как известно, в неоднородной среде (а геосреда — существенно неоднородный объект на разных масштабных уровнях от микроскопического до регионального) даже при общем сжатии локальные напряжения вблизи неоднородностей могут стать растягивающими. Очевидно, это принципиально важный результат для понимания механизма формирования очаговых зон, в частности крупномасштабных разрывов и воспроизводства структур разрушения, способный оживить и сделать более содержательной дискуссию по обсуждаемым вопросам. В итоге можно говорить об известном прогрессе в понимании процессов формирования крупномасштабных структур разрушения в земной коре, снятии ряда противоречий в трактовке самого сейсмического процесса, его феноменологическом описании и моделировании. Однако обнадеживающие результаты могут быть получены лишь при соответствующей организации и проведении мониторинговых наблюдений с учетом многомасштабной иерархической природы процессов разрушения. При этом важный результат — решение уравнений механики деформируемых твердых тел, полученных в рамках физической мезомеханики и нелинейной динамики (по существу, уравнений матфизики, являющихся физически обоснованными моделями этих процессов), содержит все основные особенности эволюционных процессов, известных ранее как из наблюдений, так и из решений базовых уравнений нелинейной динамики.

Закключение. В статье предпринята попытка рассмотрения некоторых аспектов совре-

менного состояния исследований в области теории сложных нелинейных динамических систем, находящихся вдали от термодинамического равновесия, актуальных с точки зрения сейсмологии и сейсмoeлектромагнетизма. Очевидно, нетрадиционность задач в этих областях современной геофизики связана с формированием нового направления в области нелинейной динамики весьма общего характера — теории активных (возбудимых) сред с конечным порогом неустойчивости и обладающих способностью к пространственно-временной самоорганизации, имеющей непосредственное отношение к самоорганизации в геосистемах. Достаточно широко распространена точка зрения об автоволновых механизмах самоорганизации в таких средах. В этом контексте геодинамика может рассматриваться как раздел теории динамических систем, формирования, поддержания и преобразования автоструктур в геосреде, пронизываемой потоками энергии и вещества из земных недр.

Нетрадиционность задач современной геодинамической теории в первую очередь связана с анализом механизмов пространственно-временной локализации и формирования автоструктур, их пространственным саморазвитием, превращением структур в другие под влиянием изменений параметров среды. При этом в зависимости от параметров геосистемы, в частности пространственных и временных масштабов изменений диффузионных потоков, в ней может реализовываться жесткий или мягкий режим возбуждения автоструктур. В случае мягкого режима образуются структуры малой амплитуды, формируется геометрический шум — сейсмический и сейсмoeлектромагнитный. Однако слабая сейсмичность и сейсмoeлектромагнитная активность не могут быть единственным проявлением эффектов воздействия энергомассопотоков из земных недр.

В случае жесткого режима возбуждения происходит скачкообразное возникновение автоструктур большой амплитуды, их трансформация в диссипативные структуры с обострением в условиях качественной смены типа метастабильности при определенных критических значениях параметра структурного скейлинга. Особенность диссипативных структур обострения — их резонансная природа. При этом форшоки, майнфоки и афтершоки также связывают с трансформацией автоволновых структур большой амплитуды в диссипативные структуры с обострением.

В расширенной постановке задачи прогноза и прогнозируемости это, вообще говоря, в известном смысле синтез идей нелинейной динамики с концепцией переходного рассеяния в нестационарной геосреде. В более утилитарном, прикладном смысле, новая концепция или парадигма прогноза может быть сформулирована в качестве задачи исследования отклика геосистемы на многочастотные флуктуации и шумы различной природы (внешнего и внутреннего происхождения). В принципе, он может быть реализован по временному, пространственному или пространственно-временному срезу самоорганизации. Растет понимание важности влияния шумов на характер развития геодинамических процессов и формирование состояния геосистем, выявления эффектов шумового и регулярного воздействия на активную (возбудимую) геосреду, на основании которых возможна диагностика ее типа по экспериментальным данным.

В последние годы интенсивно развиваются новые направления в нелинейной динамике, посвященные проблемам предсказуемости хаотических систем. При этом основное внимание концентрировалось на исследованиях прогнозируемости в системах, демонстрирующих СОК — сингулярного неравновесного квазистационарного состояния, для достижения которого необходимо, чтобы все вынуждающие действия на систему были как можно более медленными.

Показано, что определяющими факторами и особенностями неравновесного критического поведения рассматриваемых активных систем являются критическое замедление времени релаксации и аномально большие времена корреляции различных состояний системы, приводящие в конечном итоге к реализации динамического скейлингового поведения. Такие системы способны генерировать и формировать различные, в том числе и хаотические, пространственно-временные структуры активности, представляющие собой импульсы и фронты возбуждения, неустойчивость которых ведет к установлению в системе самоподдерживающихся колебаний определенной пространственной конфигурации, причем каждый из элементов или подсистем генерирует последовательность импульсов возбуждения с различным интервалом следования. Эти фронты возбуждений, очевидно, и являются наиболее энергетически активными и значимыми источниками спонтанных эмиссий. Заметим, что в качестве одного из основных

физических механизмов их генерации может служить переходное фрактальное рассеяние фронтов различной природы, возникающих в среде в процессе эволюции автоволновых структур. Эти спонтанные эмиссии также обладают ярко выраженными свойствами нелинейных процессов, способностью к периодической самоорганизации и хаотизации, характерному поведению при приближении к точке бифуркации (катастрофе) и выходе из нее.

Таким образом, спонтанные эмиссии — это результат и отражение эволюции, трансформации автоструктур или ансамблей автоструктур, образование автоволн и стационарных уединенных состояний (автосостояний), а ведущий физический механизм их генерации — переходное рассеивание.

Ключевые динамические объекты, способные перевести моделирование геосистем на новый уровень — метастабильность и устойчивые переходы. При этом динамический анализ метастабильных состояний и диссипативных структур или паттернов означает формирование нового направления динамической сейсмологии. Однако задачи теории переходов пространственных образов (автоструктур) оказываются значительно более сложными, чем классические задачи теории бифуркаций динамических систем: метастабильным образом в фазовом пространстве системы отвечают уже не аттракторы, а переходные множества траекторий.

Очевидно, имеются весомые основания утверждать, что существующие в настоящее время подходы к описанию сейсмического процесса в качестве задачи механики разрушения твердого тела, общей физической концепции СОК и ее модификаций, статистической модели (ETAS) или более общей модели нелинейного мультипликативного каскада (МНМК) [Родкин и др., 2015] носят весьма частный характер. В то же время прогнозные свойства геосистем с СОК продолжают оставаться в центре дискуссии о прогнозе и прогнозируемости сейсмичности, формирования очагов сейсмических событий и других актуальных вопросов сейсмологии.

Несомненно, решение этих вопросов требует более общих подходов, новых моделей и методов исследований и, что не менее важно, адекватных образов и понятий, общих для неравновесных сред произвольной природы. В частности, нелинейная динамика способствовала появлению новой трактовки и нового понимания сейсмического процесса как ре-

зультата устойчивой переходной активности геосреды, ее метастабильных состояний и последовательности таких метастабильных состояний, время существования которых достаточно велико. При этом основная идея состоит в том, чтобы описать сейсмичность в рамках ее пространственно-временной трактовки в терминах автоколебаний и автоструктур. Важным является изучение синхронизации автоколебаний и влияние шумов на синхронизацию, в частности пространственно-временных шумов. Получили развитие методы диагностики синхронизации хаоса в динамике взаимодействующих автоколебательных систем, основанные на вейвлет-преобразовании сигналов [Павлов, Анищенко, 2007]. Примечательно, что эти идеи и подходы в последнее время оказались в центре дискуссий о возможности прогноза сильных сейсмических событий. Примечательно, что в русле этих идей оказались исследования А. Любушина по поиску возможных предвестников таких событий — эффектов увеличения синхронизации (когерентного поведения) скалярных компонент многомерных временных рядов систем мониторинга (обнаружения скрытых признаков роста синхронизации сейсмических шумов). Однако пока не существует какой-либо единой и последовательной теории возникновения пространственно-временного хаоса. Остаются открытыми такие вопросы, как, к примеру, что такое пространственно-временной хаос в динамике геосистем, какую роль в его проявлениях играют структуры, как соотносятся между собой пространственный и временной хаос, каковы его характеристики и как они связаны с динамикой подсистем и особенностями взаимодействий между ними, их конкуренцией (подавлением одних колебательных мод другими и синхронизацией (координацией) во времени)? Остается нерешенным ряд вопросов слабого хаоса как ключевого условия сохранения литосферы. В столь достаточно сложной и неопределенной ситуации кажется очевидным, что хаос как фактор обновления организации системы, механизм выхода на одну из возможных тенденций ее развития и способ сохранения ее целостности, оказывается тесно связанным с вопросами прогнозируемости и прогноза ее динамики. Вопрос состоит в том, как многомасштабные многочастотные флуктуации и шумы внешнего и внутреннего происхождения изменяют состояния и другие характеристики системы. Ответ на этот вопрос является ключевым для понимания эволюции

геосистем. Заметим, однако, что реальные геосистемы, как правило, существенно структурированы, среднестатистическое среднее не может обеспечить необходимой среднестатистической количественной оценки их реакции на эти воздействия. Очевидно также, что попытки решения вопросов прогнозируемости и прогноза динамики геосистем в рамках адекватности природы сейсмичности модели детерминированного хаоса и СОК как сингулярного явления весьма дискуссионны и носят весьма ограниченный характер. Здесь мы все еще остаемся в русле идей и представлений нелинейной динамики конца 70-х — начала 80-х годов прошлого века. Остаются ощутимыми и заметными следы и последствия очарования идеями теории катастроф, распознавания образов, основанных на эмпирических признаках, статистическими методами, базирующимися на допущениях, которые сводят исследуемую геосистему к гауссовой стационарной среде. Мы все еще ориентированы, по образному выражению Ф. Дайсона, на изучение «кочек болота», на котором мы живем» [Дайсон, 2010]. Не исключено и весьма вероятно, что эти идеи в известном смысле лишь отвлекали геофизиков от действительно актуальных тем, хотя и были естественными для своего времени.

Предельно ясно, что для описания геосистем необходимы новые идеи и подходы. Осторожно можно сказать так, что в последние годы уже появились такие идеи и экспериментальные возможности решения упомянутых проблем прогноза и прогнозируемости. По меньшей мере, это — задача, которая решается в отдельных, возможно уникальных случаях, но

не поддающаяся решению с помощью универсального, единого и достаточно простого алгоритма, хотя, ввиду ее сложности, его может и не быть. Становится понятным и скрытый смысл вопроса: почему дискуссии о предсказуемости сейсмических событий [Кособоков, 2004] столь противоречивы и даже бессодержательны? Тем не менее достичь фундаментального понимания проблемы все еще не удастся, хотя полезные и необходимые обобщения, вероятно, могут быть достигнуты на пути использования методов дробной динамики — мощного аналитического аппарата, адекватного сложным нелинейным системам с многомасштабными корреляциями и в пространстве, и во времени. При этом перспективность и обоснованность дробно-дифференциального подхода основывается на таких взаимосвязанных положениях, как автомодельность, степенной закон релаксации, устойчивые распределения, дробно-дифференциальные уравнения [Зеленый, Милованов, 2004; Сибатов, Учайкин, 2009]. Соответственно, поле спонтанных эмиссий, формируемое активной геосредой, в известном смысле может быть истолковано в качестве «связности» внутренних степеней свободы формирования и эволюции автоструктур. При этом важный класс собственных динамических степеней свободы, согласованных с фрактальной геометрией геосреды, образуют фрактонные колебательные возбуждения или фрактоны, отражающие связи между структурными свойствами геосреды и процессами в ней, протекающими на различных пространственно-временных масштабах [Шуман, 2016].

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.
- Анищенко В. С., Нейман А. Б., Мосс Ф., Шимановский-Гайер Л. Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения степени порядка. *Успехи физ. наук*. 1999. Т. 169. № 1. С. 8—38.
- Ахромеева Т., Курдюмов С., Малинецкий Г., Самарский А. Структуры и хаос в нелинейных средах. Москва: Физматлит, 2007. 488 с.
- Бочков Г. Н., Кузовлев Ю. Е. Новое в исследованиях фликкер-шума. *Успехи физ. наук*. 1983. Т. 141. Вып. 1. С. 151—162.
- Бочков Г. Н., Кузовлев Ю. Е. Флуктуационно-диссипативные соотношения. *Успехи физ. наук*. 2013. Т. 183. № 6. С. 617—631.
- Гапонов-Грехов А. В., Рабинович М. И. Автоструктуры. Хаотическая динамика ансамблей. В сб.: *Нелинейные волны. Структуры и бифуркации*. Москва: Наука, 1987. С. 7—47.
- Герцик В. М. Физические представления о разрушении и прогноз вероятностей сильных землетрясений. *Физика Земли*. 2008. № 3. С. 22—39.
- Гукенхеймер Дж., Холмс Ф. Нелинейные колебания

- динамические системы и бифуркации векторных полей. Москва-Ижевск: Изд. Ин-та компьютерных исследований, 2002. 560 с.
- Гульельми А. В. Форшоки и афтершоки сильных землетрясений в свете теории катастроф. *Успехи физ. наук*. 2015. Т. 185. № 4. С. 415—429.
- 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., Новоселов О. Н. Сейсмический процесс в зоне субдукции. Мониторинг фонового режима. Москва: МГУЛ, 2014. 100 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.
- Доба Л. Н., Степанов И. В., Натяганов В. А. Эмпирическая схема краткосрочного прогноза землетрясений. *Докл. РАН*. 2013. Т. 453. № 5. С. 551—557.
- 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—850.
- Иудин Д. И. Фрактальная динамика активных систем: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 2005. 30 с.
- Кагомцев Б. Б. Динамика и информация. *Успехи физ. наук*. 1994. Т. 164. № 5. С. 1305—1329.
- Каннель Г. И., Фортон В. Е., Разоренов С. В. Ударные волны в физике конденсированного состояния. *Успехи физ. наук*. 2007. Т. 177. № 8. С. 809—830.
- Климонтович Ю. Введение в физику открытых систем. Москва: Янус-К, 2002. 284 с.
- Коган М. И. Низкочастотный токовый шум со спектром типа $1/f$ в твердых телах. *Успехи физ. наук*. 1985. Т. 143. Вып. 2. С. 285—326.
- Короновский Н., Наймарк А. Непредсказуемость землетрясений как фундаментальное следствие нелинейности геодинамических систем. *Вестник МГУ. Сер. 4. Геология*. 2012. № 6. С. 3—11.
- Кособоков В. Г. Теоретическая база и алгоритмы прогноза землетрясений на основе предвестников активизации сейсмичности: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2004. 266 с.
- Кравцов Ю. А. Случайность, детерминированность, предсказуемость. *Успехи физ. наук*. 1989. Т. 158. Вып. 1. С. 93—122.
- Кузнецов С. Н. Динамический хаос и однородно гиперболические аттракторы: от математики к физике. *Успехи физ. наук*. 2011. Т. 181. № 2. С. 121—148.
- Кузовлев Ю. Е. Почему природе нужен $1/f$ шум. *Успехи физ. наук*. 2015. Т. 185. № 7. С. 773—783.
- Лоскутов А. Ю. Очарование хаоса. *Успехи физ. наук*. 2010. Т. 180. № 12. С. 1305—1329.
- Лоскутов А. Ю., Михайлов А. С. Основы теории сложных систем. Москва-Ижевск: Изд. Ин-та компьютерных исследований, 2007. 620 с.
- Любушин А. А. Карта свойств низкочастотных микросейсм для оценки сейсмической опасности. *Физика Земли*. 2013. № 6. С. 11—20.
- Наймарк А. А., Захаров В. С. О соотношениях направленности, цикличности и нелинейности в геологических процессах. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2012. Вып. 19. № 1. С. 181—190.
- Наймарк О. Б. Структурно-скейлинговые переходы и автомодельные закономерности развития землетрясений. *Физическая мезомеханика*. 2008. Т. 1. № 2. С. 89—106.
- 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. Т. 4. Вып. 1. С. 37—51.
- Пулинец С. А., Узунов Д. Спутниковым технологиям нет альтернативы. О проблеме мониторинга природных и техногенных катастроф: *Труды ин-та прикладной геофизики им. акад. Е. К. Федорова*. Москва, 2011. Вып. 89. С. 173—185.
- Пулинец С. А., Узунов Д., Карелин А. В., Боярчук К. А., Тертышников А. В., Юдин И. А. Единая концепция обнаружения признаков готовящегося сильного землетрясения в рамках комплексной системы литосфера—атмосфера—ионосфера—магнитосфера. *Космонавтика и ракетостроение*. 2012. № 3(68). С. 21—31.
- Рабинович М. И., Мюезинолу М. К. Нелинейная динамика мозга: эмоции и интеллектуальная деятельность. *Успехи физ. наук*. 2010. Т. 180. № 4. С. 371—387.
- Ребецкий Ю. А. Новые данные о природных напряжениях в области подготовки сильного землетрясения. Модель очага землетрясения. *Геофиз. журн.* 2007. Т. 29. № 6. С. 92—110.

- Родкин М. В. Катастрофы и цивилизации. Долгопрудный: Интеллект, 2016. 232 с.
- Родкин М. В., Никитин А. Н., Васин Р. Н. Сейсмотектонические эффекты твердофазовых превращений в геоматериалах. Москва: ГЕОС, 2009. 199 с.
- Родкин М. В., Писаренко В. Ф., Нго Тхи Ли, Рукавишникова Т. А. Теоретические подходы к описанию закона распределения сильнейших землетрясений: Тезисы докладов. Киев, 2015.
- Рузмайкин А. Климат как игра случая. *Успехи физ. наук*. 2014. Т. 184. № 3. С. 297—310.
- Руманов Э. Н. Критические явления вдали от равновесия. *Успехи физ. наук*. 2013. Т. 183. № 1. С. 103—112.
- Сибатов Р. Т., Учайкин В. В. Дробно-дифференциальный подход к описанию дисперсионного переноса в полупроводниках. *Успехи физ. наук*. 2009. Т. 179. № 10. С. 1079—1103.
- Хаякава М., Коровкин Н. В. Сейсмoeлектромагнитные явления как новая область исследования радиоволновых явлений: XII Всемирный электротехнический конгресс. 4—5 октября 2011 г. Доклады и презентации. 36 с. <http://www.ruscable.ru/article/report>.
- Шановал А. Б. Вопросы прогнозируемости в изотропных моделях с самоорганизованной критичностью: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2011. 35 с.
- Шуман В. Н. Дробная динамика и эмиссионная активность геосистем. *Геофиз. журн*. 2016а. Т. 38. № 3. С. 72—83.
- 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*. 2015а. Т. 37. № 2. С. 38—55.
- Шуман В. Н. О концептуальных основах диагностики и мониторинга геосистем. *Геофиз. журн*. 2015б. Т. 37. № 4. С. 114—125.
- Шуман В. Н. О прогнозе и прогнозируемости сейсмического процесса. *Геофиз. журн*. 2014б. Т. 36. № 3. С. 48—71.
- Шуман В. Н. Сейсмический процесс и современные мониторинговые системы. *Геофиз. журн*. 2014в. Т. 36. № 4. С. 50—64.
- Шуман В. Н. Сейсмoeлектромагнетизм и пространственно-временные структуры. *Геофиз. журн*. 2015в. Т. 37. № 6. С. 24—43.
- Шуман В. Н. Спонтанная эмиссионная активность литосферы и сейсмoeлектромагнитные явления. *Геофиз. журн*. 2016б. Т. 38. № 2. С. 79—87.
- Aschwanden M. J., Crosby N. B., Dimitropoulou M. et al., 2014. 25 Years of Self-Organized Criticality: Solar and Astrophysics. *Space Sci. Rev.*, 1—120. doi 10.1007/S. 11214-014-0054-6.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K., 1987. Self-Organized Criticality: an Explanation of $1/f$ Noise. *Phys. Rev. Lett.* 59, 381—384.

On prognostication ability of active geosystems: metastability and steady transitions instead of attractors

© V. N. Shuman, 2016

Some details and special features are under considerations of undertaken experimental and theoretical studies related to prognosticated ability and forecast of geo-systems dynamics which were paid not enough attention but, possibly, might have crucial importance for definition of future studies in this area. According to the ideas of nonlinear dynamics of spatial-temporal processes and systems new capabilities and new approaches to their solutions are being discussed. Crucial dynamic objects of such an approach are meta-stability and steady transitions, and, in addition, to metastable images in phase spaces of the system do not respond the attractors but transitional sets of paths. Active role of geo-medium and its specific dynamic conditions generated by cooperative behavior of its elements and subsystems is underlined. More appropriate definition is formed of seismic process and possible mechanisms of generation of spontaneous emissions of different character, associated with transitional dissipation, more justified from both their physical interpretation and simulation. On this base and taking into account overall criteria, which guarantee the emergence of critical dynamics and discovered lately new nonlinear dynamic regimes in spread active (excited) systems actual problems are discussed of diagnostics and prognostication capability of geosystems, special role and the influence of noises of different character on the active structured

geosystems admitting self-organized critical behavior and processes of formation exponential spectra of capacity is noticed. In addition, standing apart of widely declared theses of 70-80th of last century, and unlike the strange-attractor approach, the basic attention is paid to effects of noises and fluctuations upon large-scale dynamics of geosystems. As a result the problem of local forecast in up-to-date definition may be considered as a study of a response of active (excitable) structured geomedium on multifrequency spontaneous fluctuations and external actions. Attention is paid to some special features and essential factors of formation of focal zones and evolution processes, known from observations and solutions of basal equations of nonlinear dynamics. Strong relation of spontaneous emissions of lithosphere with dynamics of auto-structures and their complexes is underlined. In addition, blocky-hierarchic heterogeneous structure of lithosphere determines not only spatial characteristics of the fields of spontaneous emissions but also, to significant extent, their temporal and energetic characteristics.

Key words: dynamic systems, seismicity, spontaneous emissions, prognostication ability of geosystems, seismoelectromagnetism, transitional processes, autostructures, systems with noise.

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).
- Anishchenko V. S., Neyman A. B., Moss F., Shymanowskii-Gayer L., 1999. Stochastic resonance: noise-enhanced order. *Uspekhi fizicheskikh nauk* 169(1), 8—38 (in Russian).
- Akhromeeva T., Kurdyumov S., Malinetskiy G., Samarskiy A., 2007. Structures and chaos in nonlinear media. Moscow: Fizmatlit, 488 p. (in Russian).
- Bochkov G. N., Kuzovlev Yu. E., 1983. New research flicker noise. *Uspekhi fizicheskikh nauk* 152(is. 1), 151—176 (in Russian).
- Bochkov G. N., Kuzovlev Yu. E., 2013. Fluctuation-dissipation relations. *Uspekhi fizicheskikh nauk* 183(6), 617—631 (in Russian).
- Gaponov-Grekhov A. V., Rabinovich M. I., 1987. Auto-structures. Chaotic dynamics of ensembles. In: *Non-linear waves. Structures and bifurcation*. Moscow: Nauka, P. 7—47 (in Russian).
- Gertsik V. M., 2008. Physical representation of the destruction and the forecast of the probability of large earthquakes. *Fizika Zemli* (3), 22—39 (in Russian).
- Guckenheimer J., Holmes F., 2002. Nonlinear vibrations dynamical systems and bifurcations of vector fields. Moscow-Izhevsk: Publ. The Institute of Computer Science, 560 p. (in Russian).
- Guglielmi A. V., 2015. Foreshocks and aftershocks of strong earthquakes in the catastrophe theory. *Uspekhi fizicheskikh nauk* 185(4), 415—429 (in Russian).
- Gufeld I. L., 2013. Is the forecast of strong crustal earthquakes? *Vestnik RAN* 83(3), 236—245 (in Russian).
- Gufel'd I. L., 2007. Seismic process. Physical and chemical aspects. Scientific publication. Korolev: TsNIIMam, 160 p. (in Russian).
- Gufel'd I. L., Novoselov O. N., 2014. Seismic process in the subduction zone. Monitoring the background. Moscow: MSFU Publ., 100 p. (in Russian).
- Gufel'd I. L., Matveeva M. I., Novoselov O. N., 2011. Why can we not make a forecast of strong crustal earthquakes. *Geodinamika i tektonofizika* 20(4), 378—415 (in Russian).
- Dayson F., 2010. Birds and frogs in mathematics and physics. *Uspehi fizicheskikh nauk* 180(8), 859—870 (in Russian).
- Doda L. N., Stepanov I. V., Natyaganov V. L., 2013. Empirical scheme of short-term earthquake prediction. *Doklady RAN* 453(5), 551—557 (in Russian).
- Zelenyy 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).
- Iudin D. I., 2005. Fractal dynamics of the active systems: Dis. Dr. phys. and math. sci. Nizhny Novgorod, 30 p. (in Russian).
- Kadomtsev B. B., 1994. Dynamics and information. *Uspehi fizicheskikh nauk* 164(5), 449—530 (in Russian).
- Kannel' G. I., Fortov V. E., Razorenov S. V., 2007. Shock waves in condensed matter physics. *Uspehi fizicheskikh nauk* 177(8), 809—830 (in Russian).
- Klimontovich Yu., 2002. Introduction to the physics of open systems. Moscow: Yanus-K, 284 p. (in Russian).
- Kogan M. I., 1985. Low-frequency current noise with

- a spectrum of $1/f$ in solids. *Uspehi fizicheskikh nauk* 143(is. 2), 285—326 (in Russian).
- Koronovskiy N., Naimark A., 2012. The unpredictability of earthquakes as a fundamental consequence of the nonlinearity of geodynamic systems. *Vestnik Moskovskogo universitetata* (6), 3—11 (in Russian).
- Kosobokov V. G., 2004. Theoretical basis and earthquake prediction algorithms based on the activation of precursors seismicity: Dis. Dr. Phys. and Math. Sci. Moscow, 266 p. (in Russian).
- Kravtsov Yu. A., 1989. Contingency, determinism predictability. *Uspehi fizicheskikh nauk* 158(is. 1), 93—122 (in Russian).
- Kuznetsov S. N., 2011. Dynamical chaos and uniformly hyperbolic attractors: from mathematics to physics. *Uspehi fizicheskikh nauk* 181(2), 121—148 (in Russian).
- Kuzovlev Yu. E., 2015. Why nature need the $1/f$ noise. *Uspehi fizicheskikh nauk* 185(7), 773—783 (in Russian).
- Loskutov A. Yu., 2010. Charm chaos. *Uspehi fizicheskikh nauk* 180(12), 1305—1329 (in Russian).
- Loskutov A. Yu., Mikhaylov A. S., 2007. Fundamentals of the theory of complex systems. Moscow-Izhevsk: Publ. The Institute of Computer Science, 560 p. (in Russian).
- Lyubushin A. A., 2013. Mapping the properties of low-frequency microseisms for seismic hazard assessment. *Fizika Zemli* (6), 11—20 (in Russian).
- Naymark A. A., Zakharov V. S., 2012. Ratios of direction, cyclicity and non-linearity in geological processes. *Vestnik KRAESC. Nauki o zemle* (1), 181—189 (in Russian).
- Naymark O. B., 2008. Structural-scaling transitions and self-development patterns of earthquakes. *Fizicheskaya mezomekhanika* 1(2), 89—106 (in Russian).
- Panteleev I. A., Plekhov O. A., Naimark O. B., 2013. Nonlinear dynamics of structures exacerbation in ensembles of defects as a mechanism for the formation of foci of earthquakes. *Geodynamics & Tectonophysics* 4(is.1), 31—51 (in Russian).
- Pulinets S. A., Uzunov D., 2011. Satellite technology there is no alternative. On the issue of monitoring of natural and man-made disasters: *Proceedings of the Institute of Applied Geophysics behalf of acad. E. K. Fedorov*. Vol. 89. Moscow, P. 173—185 (in Russian).
- Pulinets S. A., Uzunov D., Karelin A. V., Boyarchuk K. A., Tertyshnikov A. V., Yudin I. A., 2012. Uniform concept detect signs of impending strong earthquake in a complex system the lithosphere—atmosphere—ionosfera—magnetosphere. *Kosmonavtika i reketo-stroenie* (3), 21—31 (in Russian).
- Rabinovich M. I., Myuezinolu M. K., 2010. Nonlinear dynamics of the brain: emotion and cognition. *Uspehi fizicheskikh nauk* 180(4), 371—387 (in Russian).
- Rebetskiy Yu. L., 2007. New data about natural stresses in the preparation of a strong earthquake. Model of earthquake source. *Geofizicheskii zhurnal* 29(6), 92—110 (in Russian).
- Rodkin M. V., 2016. Accidents and civilization. *Dolgoprudny: Intellect*, 232 p. (in Russian).
- Rodkin M. V., Nikitin A. N., Vasin R. N., 2009. Seismotectonic effects of solid-phase transformations in geomaterials. Moscow: GEOS, 199 p. (in Russian).
- Rodkin M. V., Pisarenko V. F., Ngo Thi Ly, Rukavishnikova T. A., 2015. Theoretical approaches to the description of the distribution law of the strongest earthquakes: Abstracts. Kiev (in Russian).
- Ruzmaykin A., 2014. Climate as a game of chance. *Uspehi fizicheskikh nauk* 184(3), 297—310 (in Russian).
- Rumanov E. N., 2013. Critical phenomena far from equilibrium. *Uspehi fizicheskikh nauk* 183(1), 103—112 (in Russian).
- Sibatov R. T., Uchaykin V. V., 2009. Fractional differential approach to dispersive transport in semiconductors. *Uspehi fizicheskikh nauk* 179(10), 1079—1103 (in Russian).
- Hayakawa M., Korovkin N. V., 2011. Seismic and electromagnetic phenomenon as a new field of study radiowave phenomena: XII World Electrotechnical Congress. October 4—5, 2011 Presentations. 36 p. <http://www.ruscable.ru/article/report>. (in Russian).
- Shapoval A. B., 2011. Questions predictability in isotropic models with self-organized criticality: Abstract Dis. Dr. Phys. and Math. Sci. Moscow, 35 p. (in Russian).
- Shuman V. N., 2016a. Fractional dynamics and emissive activity of geosystems. *Geofizicheskii zhurnal* 38(3), 72—83 (in Russian).
- Shuman V. N., 2014a. Nonlinear dynamics of geomedium: transitional processes and critical phenomena. *Geofizicheskii zhurnal* 36(6), 129—142 (in Russian).
- Shuman V. N., 2015a. Nonlinear dynamics, seismic activity and aerospace sounding systems. *Geofizicheskii zhurnal* 37(2), 38—55 (in Russian).
- Shuman V. N., 2015b. On conceptual grounds of diagnostics and monitoring of geosystems. *Geofizicheskii zhurnal* 37(4), 114—125 (in Russian).
- Shuman V. N., 2014b. On the forecast and the predict-

- ability of the seismic process. *Geofizicheskiy zhurnal* 36(3), 48—71 (in Russian).
- Shuman V. N., 2014c. Seismic processes and advanced monitoring system. *Geofizicheskiy zhurnal* 36(4), 50—64 (in Russian).
- Shuman V. N., 2015c. Seismoelectromagnetism and spatio-temporal structures *Geofizicheskiy zhurnal* 37(6), 24—41 (in Russian).
- Shuman V. N., 2016b. Spontaneous emission activity of lithosphere and seismoelectromagnetic phenomena. *Geofizicheskiy zhurnal* 38(2), 79—87 (in Russian).
- Aschwanden M. J., Crosby N. B., Dimitropoulou M. et al., 2014. 25 Years of Self-Organized Criticality: Solar and Astrophysics. *Space Sci. Rev.*, 1—120. doi 10.1007/S. 11214-014-0054-6.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K., 1987. Self-Organized Criticality: an Explanation of $1/f$ Noise. *Phys. Rev. Lett.* 59, 381—384.