

Нелинейная динамика, сейсмичность и аэрокосмические зондирующие системы

© В. Н. Шуман, 2015

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 3 февраля 2015 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

Розглянуто процеси та явища, які з позиції нелінійної динаміки можуть бути реалізовані і є типовими для геосистем. Увагу зосереджено на особливостях і нових можливостях, які дають ідеї і підходи до нелінійної динаміки для вирішення прикладних задач геофізики. Проаналізовано передумови для фізичної інтерпретації спонтанної електромагнітної і сейсмоакустичної емісії як продукту безперервних у часі перехідних динамічних процесів, пов'язаних із взаємодією різних підсистем геосередовища як його метастабільних станів і послідовності останніх. Зроблено спробу аналізу літосферно-атмосферно-іоносферних зв'язків, методів багатопараметричного аэрокосмічного моніторингу короткострокових провісників сильних сейсмічних подій. Обговорено його можливості та обмеження, необхідність комплексування пасивних моніторингових систем, які ґрунтуються на вивченні спектрів емісійних сигналів і генеруються геосередовищем, з активними системами, які орієнтовані на контроль сприйнятливості геосистеми. Підкреслено безпідставність спроб надійного і точного короткострокового прогнозу поза межами досліджень фізики формування осередків руйнації та розвитку деформаційного процесу в земній корі на заключній стадії в режимі із загостренням.

Ключові слова: спонтанна електромагнітна та сейсмоакустична емісія, динамічні процеси, геосистеми, аэрокосмічний моніторинг.

Введение. В последние годы заметно углубился интерес геофизиков к проблеме описания геосреды как открытой неравновесной системы с множеством самоорганизующихся структур (подсистем). Согласно М. А. Садовскому, ей оказалась присуща внутренняя самоподобная структура, в которой нет места для какой-либо области с характерными размерами и границами, как не существует и какого-либо характерного масштаба. Основным процессом, протекающим в такой среде, оказался процесс самоорганизации. Показано, что она (геосреда) может рассматриваться не как пассивный континуум, а как активная (возбудимая) среда, в которой роль начального возбуждения играют энергетические потоки из низов литосферы, и может быть представлена в качестве ансамбля открытых нелинейных диссипативных систем.

Очевидно, в рамках таких представлений геосреда, стремящаяся к самоорганизации, нуждается в качественно новых моделях описания, которые бы позволили анализировать диссипацию поступающей в нее энергии, релаксацию локальных напряжений, стационарные режимы деформирования и др. Нетрадиционность задач современной динамической

теории неравновесных нелинейных сред связана, очевидно, с явлениями структурообразования и хаотической динамики ансамблей их структур (подсистем), «бифуркацией» их пространственных образов. Процессы в таких системах приводят к формированию устойчивых локализованных упорядоченных состояний, представляющих собой диссипативные структуры или автоструктуры, причем, как правило, при этом наблюдаются не уединенные автоструктуры, а ансамбли таких структур. Установлено, что возникновение диссипативных структур имеет пороговый характер, который неравновесная термодинамика связала с неустойчивостью системы: новая структура является результатом неустойчивости и возникает из флуктуаций.

Отличительные признаки нелинейных диссипативных систем — необратимые изменения во времени, пространственная и временная иерархическая делимость (фрактальность), недетерминированность поведения после прохождения критической точки (бифуркации), волновая и резонансная природа всех процессов, большая (а иногда и определяющая) роль малых возмущений. Имеются весомые основания полагать, что такая сложная система, как

геосреда, упорядочивающая себя в зависимости от интенсивности и скорости поступающей в нее энергии, может быть представлена в виде автоколебательной системы.

Как известно, для автоколебательных систем характерны такие явления, как синхронизация, которую можно рассматривать как способ самоорганизации взаимодействующих подсистем, подстройку ритмов осциллирующих элементов за счет относительно слабого взаимодействия между ними, и конкуренция колебаний (подавление одних колебательных мод другими). Напомним в этой связи, что автоколебания соответствует условию, при котором отклик системы на внешнее воздействие оказывается непропорциональным воздействующему усилию, причем рассматриваемые сложноорганизованные системы оказываются избирательно чувствительными: они демонстрируют неожиданно сильные отклики на адекватные их внутренней структуре возмущения.

Акцент современной теории автоколебаний начал смещаться в сторону все более сложных, в том числе хаотических, колебаний, однако в ее основе по-прежнему находятся динамические принципы, заложенные А. А. Андроновым. Это — выделение и исследование структурно устойчивых систем и явлений, анализ структуры разбиения фазового пространства (пространства состояний) системы на траектории, включающий, в первую очередь, исследование аттракторов, исследование эволюции колебательно-волновых процессов при изменении параметров системы и выявление бифуркаций, определяющих перестройку этих процессов. В то же время нелинейно-динамический подход для геосистем наталкивается на значительные трудности, связанные с их необычностью и сложностью, отсутствием во многих случаях понимания архитектуры системы и особенностей межблочных взаимодействий.

Заметим, что все сложные диссипативные структуры являются метастабильно устойчивыми. Они могут формироваться на ранних этапах эволюции и развиваться в соответствии с автомодельными законами длительное время, сохраняя свою архитектуру, но распадаться при возмущениях, превышающих критические. Автомодельность — главная особенность эволюции таких сложных нелинейных систем в случае сильно коррелируемого поведения их подсистем.

Геосреда как нелинейная многомасштабная система, как уже отмечалось, обладает свой-

ством саморганизованной критичности (СОК), относящейся также к базовым свойствам геосреды и выражающейся в степенной статистике ее системных параметров, а также наличием медленной динамики, миграции деформационной активности, перехода медленного квазистационарного режима деформирования в локальных областях в режим с обострением [Макаров, 2012; Пантелеев и др., 2013].

Пришло осознание того, что подход, основанный на идеях и принципах нелинейной динамики, является важным и эффективным направлением исследования геосистем.

Как известно, на уровне фундаментальных идей основы нелинейной динамики были заложены в работах И. Пригожина, С. П. Курдюмова, Г. Г. Малинецкого, П. Хакена и многих других исследователей. Часто ставится знак равенства между нелинейной динамикой как математической теорией эволюции динамических систем и синергетикой как теорией их самоорганизации. Один из ее ключевых элементов — понятие открытой системы, в которой идет постоянный обмен энергией, веществом и энтропией с внешней средой. При этом нелинейная динамика как междисциплинарная теория предложила методологию изучения систем весьма разнообразной природы. Ее основная задача — поиск законов, по которым функционируют отдельные части системы, ее подсистемы и как они взаимодействуют между собой, порождая коллективное поведение, отличное от поведения подсистем. Общие принципы, которые управляют динамикой таких крупномасштабных систем, в общих чертах могут быть сформулированы в следующем виде:

- качественная независимость поведения от умеренного шума;
- воспроизводимость поведения при близких условиях внешней среды и состояниях организации;
- конкурентность (подавление одних колебательных мод другими, за энергоресурсы);
- различный отклик на внешнее воздействие в зависимости от условий самовозбуждения в данный конкретный момент времени, в том числе и от уровня шумов в системе;
- среднеквадратичное среднее, которое не обеспечивает достаточную количественную оценку реакции системы на внешнее воздействие из-за структурированности системы.

Понятно, что ввиду исключительной сложности геосистемы для ее успешного описания необходим некий оптимальный уровень абстрагирования от деталей. Возможно, это мо-

жет быть уровень переходных мод (динамических процессов) и метастабильных состояний [Рабинович, Мюезинолу, 2010].

В настоящее время получил развитие новый раздел нелинейной динамики — дробная динамика, в котором рассматриваются общие свойства физических процессов со степенной памятью, степенной нелокальностью и фрактальностью [Tagarov, 2008].

Обратим внимание еще на одно важное обстоятельство: как известно, идея М. А. Садовского о модели литосферы в качестве системы взаимодействующих между собой отдельных частей, вообще говоря, и находится в русле концепции самоорганизации И. Пригожина, но в действительности выходит за ее рамки. В частности, это идея о роли разломов литосферы, которые, начиная с некоторого масштабного уровня, представляют собой не плоскости раздела, а зоны разной степени трещиноватости и раздробленности, в которых происходят активные диссипативные процессы.

Перечислим некоторые процессы, которые с точки зрения нелинейной динамики могут быть реализованы и являются типичными в геосистемах: синхронизация под действием внешнего неперiodического или случайного воздействия, авторезонанс, динамический и стохастический резонанс, шумоиндуцированные переходы, перемежаемость как непрерывный переход от регулярного движения к хаотическому [Лоскутов, 2010].

В связи с развитием аэрокосмических средств наблюдения появились к настоящему времени уникальные возможности изучения геодинамического режима земной коры и протекающих в ней процессов, дающие новый взгляд на рассматриваемую проблему. Получили развитие методы спутникового мониторинга возможных предвестников сильных сейсмических событий [Липеровский, 2006; Пулинец, Узунов, 2011; Черногор, 2011; Боярчук и др., 2012]. Развита представления о том, что физическая система Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера — это сложная открытая нелинейная динамическая система, ни одна из перечисленных подсистем которой, как оказалось, не является полностью самодостаточной, так как ее текущее состояние однозначно не определяет ее эволюцию в будущем.

Основная цель данной публикации — попытаться разобраться в важном с точки зрения геофизических приложений вопросе: что нового дают идеи и подходы нелинейной динамики при решении задач литосферно-ионосферных

связей, понимания механизмов, их реализующих, новых возможностей спутниковых технологий при развертывании систем мониторинга сейсмичности, в частности, возможностей ее краткосрочного прогноза.

Представляется весьма странным, что во многих, даже вышедших совсем недавно работах, посвященных этим вопросам, хотя и подчеркивалась или декларировалась ключевая роль нелинейной динамики в решении указанных проблем, ее аппарат, ключевые представления и результаты, как правило, использовались весьма фрагментарно. И хотя за последние годы здесь удалось узнать много нового, ссылки на современное состояние вопроса в доступной нам литературе весьма ограничены.

Актуальная задача — попытаться разобраться в том, почему ситуация именно такова. Почему зачастую весьма проблематично обнаружить здесь какое-либо подобие общей схемы или хотя бы наброска решения перечисленных вопросов и как приблизить сложившуюся ситуацию к экспериментальной.

На первый взгляд может показаться, что искомые ответы почти очевидны: некоторые понятия нелинейной динамики весьма формализованы и рафинированы, а ряд ее изящных конструкций в реальности не наблюдаемы. Но это, очевидно, только часть проблемы. Другая часть, возможно, связана с фундаментальностью, неоднозначностью и масштабами проблемы, возможностью различного физического содержания процессов, протекающих на разных уровнях геометрически самоподобной структуры геосреды. В то же время можно надеяться, что поиски ответов могут дать новый взгляд на явления и процессы в ней.

Дистанционные зондирующие системы — о состоянии вопроса. В связи с интенсивным развитием новых технологий измерений различных физических процессов, в частности, с развитием методов аэрокосмического мониторинга различных проявлений природных и техногенных катастроф, в последние годы значительно расширили свои рамки и сферы применения дистанционные зондирующие системы (ДЗ) для решения широкого спектра прикладных задач геологии и геофизики: картирования литологического состава поверхностных комплексов земной коры, включая гидротермально-метасоматические изменения горных пород, обнаружения тектонических нарушений, выявления площадей, перспективных на поиски углеводородов, монито-

ринга опасных геологических процессов. В рамках этих исследований получены важные результаты по дистанционному зондированию атмосферы, суши и океана, контролю физико-химических явлений и процессов в атмосфере, ионосфере, магнитосфере, околоземном космическом пространстве, их возможному влиянию на геодинамические процессы [Горный, Тронин, 2012; Вторая..., 2014].

Выполнен комплекс геохимических и спектрометрических работ по изучению спектральных характеристик приповерхностных отложений в связи с концентрациями в них таких элементов, как свинец, цинк, мышьяк. Развита комплексная технология прогнозирования месторождений меди, никеля, золота, олова, полиметаллов и др., включающая визуальное и формализованное дешифрирование космических съемок различного масштаба и специализированную обработку данных. Ведется активная разработка формализованных методов обнаружения территорий, перспективных на поиски углеводородов. Отмечается широкое использование спутниковой радиолокационной интерферометрии для изучения деформаций земной поверхности, основанной на измерении амплитуды и фазы отраженного от этой поверхности радиолокационного сигнала. Продемонстрированы возможности новой технологии изучения деформаций земной поверхности на основе спутникового позиционирования GPS/Глонасс, дополняющей и контролирующей данные спутниковой интерферометрии с использованием наземных приемников GPS. Создаются соответствующие сети наблюдений. В частности, в Японии такая национальная сеть насчитывает более 1200 станций, расположенных на удалении 20—50 км и проводящих мониторинговые измерения каждые 30 с.

Получила развитие методология, основанная на применении методов эталонной классификации многомерного признакового пространства по материалам дистанционных геофизических съемок. Большое количество работ опубликовано по результатам изучения тепловых процессов в системе литосфера—атмосфера—ионосфера. Имеют обширную историю и библиографию ионосферные исследования сейсмической активности.

В этой связи нашли широкое применение космические средства, позволяющие отслеживать деформации земной поверхности. В частности, в работах по изучению и прогнозу сейсмической активности NASA (США)

акцентируется внимание на использовании высокоточной системы глобального позиционирования GPS, спутниковых радаров с синтезированной апертурой In SAR. Как оказалось, использование этих технологий обеспечивает высокоточный мониторинг движений элементов земной поверхности — вплоть до нескольких миллиметров [Бучаченко и др., 1996; Липеровский, 2006; Пулинец, Узунов, 2011; Хаякава, Коровкин, 2011; Боярчук и др., 2012].

Считается весьма перспективным (даже безальтернативным) направлением по краткосрочному прогнозу сейсмичности наблюдения за ионосферой [Пулинец, Узунов, 2011].

Важная особенность дистанционных систем — возможность наблюдения Земли как целостной взаимодействующей с Космосом системы, изучение ее структуры и протекающих в ней процессов. При этом космический мониторинг позволяет получать однородную и сопоставимую по качеству геолого-геофизическую информацию для весьма обширных регионов, что трудно достижимо при наземных исследованиях.

В рамках синергетического подхода к сложным открытым системам сравнительно недавно предложена концепция обнаружения комплекса аномальных вариаций окружающей среды в области готовящегося землетрясения и, соответственно, физическая модель, называемая LAIC (Lithosphere — Atmosphere Ionosphere Coupling), в которой предпринята попытка связать в единую цепь физических процессов различные геофизические и геохимические параметры, в частности тепловые и атмосферные аномалии с сейсмоионосферными аномалиями [Пулинец и др., 2011; Боярчук и др., 2012].

Говоря об основных и регулярно обнаруживаемых предвестниках сейсмических событий, прежде всего, имеются в виду вариации радона, тепловые аномалии в виде уходящего потока длинноволнового инфракрасного излучения, температура и относительная влажность приземного воздуха, аномальная облачность, аномалии электронной концентрации ионосферы и др. В рассматриваемой схеме комплексных взаимодействий LAIC радон, мигрирующий из земной коры в атмосферу, играет ключевую роль: именно он запускает рассматриваемую цепочку процессов в атмосфере, ответственных за появление различных типов краткосрочных предвестников [Пулинец, Узунов, 2011; Боярчук и др., 2012].

Тем не менее природа вариаций и миграции радона до конца не выяснена. Как известно,

при измерении объемной активности радона и плотности потока радона (активности радона, выходящего из единицы площади поверхности в единицу времени) существует ряд проблем, затрудняющих использовать его аномалию (а значит, и запускаемую им цепочку явлений в атмосфере—ионосфере) в качестве надежного предвестника сейсмического явления. В частности, вариации радона подвержены модулирующему влиянию как внутренних (геодинамических), так и внешних факторов. Кроме того, особенности и типы геоструктур ведут к разнообразию динамики приповерхностной концентрации радона. Приливные деформации и смена погодных условий в существенной степени определяют режим миграции радона из земных недр. При этом выброс радона может происходить не только до, но и во время и после землетрясения. Примечательно, что статистика данных, полученных по 300 землетрясениям, свидетельствует о том, что только примерно в 75% случаев землетрясениям предшествовало заметное повышение концентрации радона [Липеровский, 2006].

Заметим в этой связи, что всплеск интереса к этим вопросам, очевидно, является своеобразным отражением «радонового бума» начала 90-х годов прошлого века, инициированного на Западе, так и не давшим, однако, конкретных результатов относительно краткосрочного прогноза. В то же время, по мнению И. Гуфельда [Гуфельд, 2013], спутниковый мониторинг земной поверхности и приповерхностной атмосферы позволяет, в принципе, обнаруживать эффекты разгрузки литосферы природными газами. Однако следует учитывать тот факт, что поверхностный слой земной коры связан с глубинными процессами только через разгрузку природных газов, а не с процессом формирования крупномасштабных структур разрушения. Очевидно, здесь все еще необходим некоторый период изучения, чтобы отобрать реально эффективную совокупность наблюдаемых предвестников, прежде чем начать практический прогноз (Концепция развития российской космической системы ДЗЗ на период до 2025 года. www.gisa.ru/file/766.doc.) При этом тепловая космическая съемка, несомненно, должна быть неотъемлемой частью системы глобального контроля за сейсмичностью.

Тем не менее тезис о безальтернативности спутниковых технологий, ставший в последнее время центром дискуссий среди многих сейсмологов, основанный на новейших и весьма

продвинутых технологиях дистанционной регистрации процессов в системе литосфера—атмосфера—ионосфера, учитывая опыт предшествующих мониторинговых наблюдений, не представляется бесспорным. Как известно, скепсис в отношении прогноза сейсмичности, особенно в отношении краткосрочного, оказывался особенно силен там, где были созданы технически наиболее продвинутое и совершенные мониторинговые сети и, казалось бы, перспектива его надежной реализации была так близка.

Самоорганизованная критичность и прогнозируемость процессов. Как известно, парадигма самоорганизованной критичности (СОК) — эволюции системы к критическому состоянию без настройки каких-либо параметров — возникшая первоначально в связи с необходимостью понять наиболее общие закономерности в поведении сложных нелинейных динамических систем, обнаруживающих самосогласованное стремление к критическим режимам, сразу же привлекла к себе повышенное внимание геофизиков после разработки П. Баком, С. Тангом и К. Визенфельдом первой модели, демонстрирующей это свойство [Bak et al., 1987; Шаповал, 2011]. Основная задача авторов СОК — объяснить причины возникновения флуктуаций в сложных неравновесных средах со спектром типа $1/f^{\beta}$, состоящих из многочисленных взаимодействующих подсистем, тоже нелинейных. Феномену СОК, объясняющей стремление таких сложных систем к режиму с обострением в области низких частот, посвящена обширная литература (см., например, [Зеленый, Милованов, 2004] и цитируемые там источники). В последние годы установлено соответствие СОК фундаментальным физическим принципам, лежащим в основе современной теории динамических систем. Как оказалось, для достижения самоорганизованной критичности необходимо, чтобы все внешние воздействия на динамическую систему были как можно более медленными: в этом случае стремление системы к СОК становится универсальным явлением, не зависящим от специфики системы. В этом случае свойство СОК вытекает из минимальности действия в пространстве неравновесных стационарных состояний [Зеленый, Милованов, 2004].

Иначе говоря, универсальность СОК как явления связано с предположением о медленности изменений внешних вынуждающих воздействий — потоков, пронизывающих систему. Разумеется, в ряде случаев предположение о

медленности изменений внешних воздействий, как и симметрии связей между подсистемами геосреды, могут быть не только нереалистичными, но и существенно менять существо дела на пути моделирования и прогноза динамики сложных переходных состояний в системе. В итоге задача прогнозируемости систем с СОК оказывается весьма сложной.

Естественно, прогнозные свойства модели БТВ и ее модификации оказались в центре дискуссий о прогнозируемости сейсмических событий. В частности, на основе тезиса о том, что системы, обладающие масштабной инвариантностью $F(s) \sim s^{-b}$, было принято считать непредсказуемыми, в дебатах на страницах журнала «Nature» за 1999 г. обсуждался вопрос, действительно ли существует принципиальная возможность прогноза сейсмичности. Предпринимались попытки подтверждения гипотезы о непрогнозируемости систем с СОК в различных моделях сейсмичности. Некоторые исследователи продолжают утверждать о невозможности прогноза, если опираться на закон Гутенберга — Рихтера.

Таким образом, «... следует либо считать недостаточно обоснованным результаты прогноза землетрясений, либо поставить под сомнение самоорганизацию сейсмических процессов, либо уточнить гипотезу о непредсказуемости типичных систем с СОК» [Шаповал, 2011]. А. Б. Шаповал утверждает, что эмпирический анализ свидетельствует о существовании эффективного прогноза в системах с СОК, а представление о самоорганизации сейсмического процесса согласуется с предсказуемостью наиболее сильных событий. В то же время следует заметить, что эффективность прогноза весьма зависит от локальной нестационарности процесса и является неоднородной во времени, причем стационарность такой модельной системы имеет место лишь на чрезвычайно длинных временных интервалах. Это вполне согласуется с приведенными выше соображениями о требовании медленности изменений внешних воздействий на систему. В итоге, хотя теория СОК и адекватно во многих случаях отвечает задачам истолкования экспериментальных данных по изучению флуктуаций со спектром $1/f$ (появление характерного розового шума на низких частотах), вопросы понимания общих закономерностей пространственно-временного поведения нелинейных полей и возмущений в диссипативных неравновесных средах, их важных деталей, остаются весьма актуальными.

Очевидно, исследование этих и близких к ним явлений требуют разработки новых моделей, методов и, что не менее актуально, адекватных образов и понятий, общих для неравновесных сред произвольного типа. Весьма вероятно, что в этом контексте особый интерес вызывает новый раздел современной физической теории — дробная динамика, в которой рассматриваются самые общие свойства физических процессов со степенной памятью, степенной нелокальностью и фрактальностью. Очевидно, дробная или странная динамика — новый аналитический аппарат, адекватный сложным нелинейным системам с многомасштабными корреляциями в пространстве и времени [Зеленый, Милованов, 2004; Тарасов, 2009; Рабинович, Мюэзинолу, 2010]. Весьма важно, что этот математический формализм, лежащий в основе дробной динамики, в некотором смысле оказывается эквивалентным методу обобщенного характеристического уравнения. Такой подход не нарушает аналитическую структуру важнейших уравнений математической физики [Зеленый, Милованов, 2004].

В принципе возможен синтез дробной динамики с фрактальной топологией, связующим звеном между которыми являются представления о неравновесном квазистационарном состоянии системы, устойчивость которого (как динамическая, так и структурная) достигается за счет многомасштабных корреляций в пространстве и времени. С этой точки зрения сейсмичность может быть истолкована и трактоваться в качестве результата устойчивой переходной активности геосреды как активной неравновесной системы с конечной во времени плотностью энергетических ресурсов.

Как уже отмечалось, имеются весомые основания думать, что ее описание окажется эффективным на уровне переходных мод и метастабильных состояний (процессов), связанных с взаимодействием различных подсистем геосреды и их ансамблей, их синхронизацией и подавлением одних колебательных мод другими, исследования синхронной динамики и влияния шумов на синхронизацию, особенностей превращения одних структур в другие при изменении параметров геосистемы. Ввиду обширности, важности и специфичности темы, а также в контексте полученных в этой области теоретических результатов, попытаемся рассмотреть проблему прогнозируемости сейсмического процесса более подробно, включая и ее краткий исторический аспект. Продолжим исследование этих проблемных вопросов, на-

чатые автором в предыдущих публикациях [Шуман, 2014а—в].

Как известно, особый размах исследования в области прогноза сейсмической активности получали начиная с 50—60-х годов прошлого века. Всплески оптимизма и близости цели, ирония и скепсис, иллюзии и безысходность, подъемы и спады — характерные черты этих исследований и состояния вопроса. Библиография по прогнозу сейсмичности весьма обширна. В рассматриваемом контексте достаточно сослаться на недавно вышедшие публикации, посвященные этому вопросу, и приведенные там ссылки [Соболев, Пономарев, 2003; Кособоков, 2005; Шебалин, Воробьева, 2006; Гуфельд, 2007; 2013; Родкин и др., 2009; Гуфельд и др., 2011; Шаповал, 2011; Пантелеев и др., 2013 и др.]. При этом данные публикации следует рассматривать в совокупности, так как приведенные в них ссылки часто канализуемы, ограничены, специфичны, отражающие вкусы и предубеждения авторов.

Очевидно, доминанта проблемы прогноза сейсмичности — отсутствие должного понимания физики процесса, являющегося основным препятствием ее успешного решения. И хотя за последние десятилетия удалось значительно продвинуться на этом пути, текущее развитие событий лишь подтверждает эту точку зрения, высказанную еще в 80-х годах прошлого века известным сейсмологом Н. В. Шабалиным. Возможно, как реакция на безуспешность попыток прогноза в 90-х годах получила широкое распространение и многочисленных сторонников концепция о принципиальной непредсказуемости землетрясений, особенно в краткосрочной перспективе. И такой подход, как это ни парадоксально, получил наибольшую поддержку как раз там, для тех территорий, где, как уже упоминалось, были созданы наиболее плотные и обширные мониторинговые сети [Родкин и др., 2009]. Тем не менее, тезис принципиальной непредсказуемости сейсмичности не получил достаточного обоснования и, вообще говоря, не соответствует реальной ситуации. В частности, примерно в то же время была продемонстрирована статистическая значимость результатов применения некоторых алгоритмов среднесрочного прогноза, достаточно эффективно предсказывающих сильные сейсмические события в реальном времени [Шаповал, 2011]. Было установлено, что в рамках систем с СОК возможно построение модели сейсмического процесса, крупные события которой прогнозируемы с помощью

адаптивных предвестников. Однако, вследствие своей универсальности эти алгоритмы прогноза, практически не использующие другие геофизические данные, кроме сейсмических, в частности информации о других геофизических полях, обладают определенной ограниченностью и, соответственно, являются недостаточными для реального прогноза, особенно краткосрочного. Попытка снятия этих ограничений предпринята Г. А. Соболевым, хотя в его подходе учет изменчивости геофизических полей все еще продолжает играть второстепенную роль. При этом его алгоритмы прогноза также основаны на концепции СОК, но дополнены представлениями модели разрушения С. Н. Журкова (его концентрационном критерии [Журков и др., 1977], справедливость которого, по мнению ряда исследователей, как будто подтверждается на большом объеме экспериментальных данных [Уломов, 2007]). Тем не менее в последние годы стала очевидной ограниченность общепризнанной модели разрушения, согласно которой землетрясения должны быть локализованы в областях высоких тектонических напряжений. Как оказалось, областям формирования особо сильных землетрясений соответствуют участки их относительно небольших или умеренных значений [Родкин и др., 2009; Гуфельд, 2007, 2013].

Стало понятно, что любой прогноз разрушения, в принципе, невозможен без учета многомасштабной иерархической природы процесса разрушения, особенностей развития его медленной квазистационарной и сверхбыстрой стадии и условий перехода стадии устойчивого развития разрушения в неустойчивый сверхбыстрый режим [Макаров, 2012]. Традиционная механика не смогла предложить удовлетворительных математических моделей описания упомянутых стадий и самого процесса разрушения как многомасштабного явления, а традиционный критериальный подход, основанный на макроскопическом масштабе усредненного описания, в принципе не может решать проблему прогноза разрушения.

Однако совсем недавно предпринята попытка ревизии, казалось бы, бесспорного факта о невозможности прогноза сейсмичности без понимания основных механизмов, особенностей и закономерностей локализации деформационных процессов и формирования очагов разрушения в геосреде.

По мнению А. А. Наймарка и В. С. Захарова [Наймарк, Захаров, 2012, с. 188], «дело не в том, что механизм подготовки сейсмического со-

бытия изучен недостаточно: но сам механизм таков, что порождает непредсказуемую хаотическую динамику». Становятся невозможными ни надежное прогнозирование будущего, ни реконструкция прошлого. По существу, это возврат к тезису принципиальной непредсказуемости землетрясений, популярному в конце 90-х годов прошлого века, о котором уже упоминалось выше, но уже с попыткой его обоснования на базе нелинейной динамики. Этот тезис обосновывается тем обстоятельством, что «при достаточной удаленности от равновесия нелинейность порождает непрогнозируемую динамику». Это весьма любопытная, хотя, очевидно, и весьма частная трактовка проблемы. Действительно, как известно, сильная нелинейность разрушает фазовое пространство системы. В то же время нелинейность может существенно усилить поглощение. Стало понятным, что вообще наш мир устойчив за счет нелинейности.

С физической точки зрения важное значение имеет также установление и осознание следующих факторов: переход диссипативных нелинейных систем в режим стохастического поведения при изменении их параметров осуществляется лишь несколькими различными способами, причем эти пути перехода зачастую оказываются общими не только для систем различной физической природы, но вблизи границы перехода и для сосредоточенных и распространенных систем [Рабинович, 1983].

Несомненно, предикторы землетрясений, обладающие определенной надежностью, могут быть получены только из теоретических представлений о физике процесса.

Примечательно, что история вопроса о возможностях прогноза сейсмичности по имеющимся данным о процессах, происходящих в системе литосфера—ионосфера, и в связи с наступлением эры спутниковых технологий в общем демонстрирует весьма сходную картину, а именно от констатации о невозможности создания спутниковых или ионосферных систем прогноза при жестких требованиях к уровню пропуска цели [Пилипенко, 2006; Гуфельд, 2007; 2013] до утверждений об универсальности и даже безальтернативности построения любых систем мониторинга и прогноза сейсмичности без использования спутниковых технологий [Пулинец, Узунов, 2011; Боярчук и др., 2012]. И далее «...несмотря на известный пессимизм и даже отрицание принципиальной возможности краткосрочного прогноза ... сегодня можно утверждать, что эта важная проблема геофи-

зики фактически решена» [Дода и др., 2013]. И это на основании некоторой эмпирической схемы прогноза, фактически не опирающейся на какие-либо конкретные свойства литосферы и процессов в ней. И хотя авторы и отмечают, что эта эмпирическая схема может давать сбои в ряде случаев, а теоретическое обоснование отдельных ее граней и физических механизмов взаимосвязи различных признаков приближающегося сейсмического события на количественном уровне пока отсутствует, это не меняет существа дела — проблема решена. Однако даже при беглом рассмотрении этой схемы становится понятно, что те возмущения, которые трактуются как предвестники, отражают лишь региональные возбуждения системы литосферных блоков за счет активации процессов дегазации. Можно только надеяться, что подобный мониторинг позволит лишь приблизиться к прогнозу события и локализации зоны крупномасштабного разрыва, которая пока остается весьма неопределенной. Поиск же каких-либо косвенных признаков прогноза сейсмичности в раздробленном и ненагруженном поверхностном слое, связанным с глубинными процессами только через разгрузку природных газов и в большой степени поверхностном воздействии внешних воздействий (метеофакторов, приливных явлений, сейсмических волн удаленной сейсмичности и др.), по мнению И. Л. Гуфельда, не мог дать положительных результатов [Гуфельд, 2013]. В то же время обнаружение положительных тепловых аномалий, ассоциируемых с активными разломами в земной коре, весьма примечательно.

Ввиду особой дискуссионности вопроса, остановимся на некоторых его аспектах более подробно.

Литосферно-атмосферно-ионосферные связи и прогноз сейсмичности. В настоящее время, как уже упоминалось, большое внимание уделяется наземным и космическим системам исследования свойств литосферы, атмосферы, ионосферы и развивающихся в них динамических процессов. И если физико-химические процессы в каждой из этих подсистем этой сложной открытой, существенно нелинейной системы, получили, можно сказать, более-менее адекватную трактовку, эффекты и механизмы их взаимодействия менее изучены и известны [Черногор, 2011]. Взаимодействия между подсистемами весьма разнообразны и осуществляются с помощью квазистатических (гравитационного, электрического, магнитно-

го) переменных электромагнитных полей различной природы, акусто-гидродинамических волн, потоков плазмы, излучений и др. В них имеют место необратимые диссипативные процессы, при этом особый интерес представляют ситуации, когда в рассматриваемой подсистеме возникают различные нелинейные структуры за счет притока энергии, вещества из другой подсистемы [Липеровский, 2006; Черногор, 2011]. Подсистемы находятся в метастабильном состоянии, весьма чувствительны к внешним воздействиям относительно слабых возмущений и флуктуаций. В приповерхностном слое осуществляется активный контакт литосферы и атмосферы, наблюдаются интенсивные массо- и энергообменные процессы, происходит взаимодействие между физическими полями. Большой динамичностью и изменчивостью характеризуются электрические процессы. При этом сам приповерхностный слой оказывает значительное влияние на приземный слой атмосферы, являясь источником радиоактивных эманаций, водяного пара, аэрозолей, определяет его температурный режим и, соответственно, устойчивость и вертикальный перенос.

К настоящему времени выдвинуто несколько вероятных гипотез относительно механизма связи между литосферной активностью и ионосферой, в частности химический, акустический и гравитационно-волновой, электромагнитный [Липеровский, 2006; Хаякова, Коровкин, 2011]. В первом аномальные возмущения в атмосфере, ионосфере и магнитосфере вызваны, наряду с температурой земной поверхности, эманацией радиоактивных газов (в основном, радона) из земной коры. Они индуцируют возмущения в проводимости атмосферы, что обуславливает изменения ионосферы под влиянием атмосферного электрического поля, внося таким образом существенный вклад в баланс глобальной электрической цепи.

Разумеется, радон здесь играет решающую роль, запуская в атмосфере цепь процессов, причем в некоторой временной последовательности с определенным запаздыванием по мере увеличения высоты проявления регистрируемой аномалии [Пулинец, Узунов, 2011; Боярчук и др., 2012]. Иначе говоря, вариации радона здесь принципиально важны для реализации всей цепи генерации краткосрочных предвестников сейсмических событий. Это дает возможность ввести в рассмотрение и использовать некие обобщенные параметры (в частности, такие, как поправка к химическому

потенциалу и вариации регионального содержания электронов относительно их глобального содержания), которые, в принципе, позволяют определить стадию подготовки события [Боярчук и др., 2012]. Именно такой подход считается перспективным по краткосрочному прогнозу по наблюдениям за ионосферой.

Второй механизм взаимосвязи между литосферной активностью и ионосферой основан на ключевой роли атмосферных колебаний в системе литосфера—атмосфера—ионосфера: возмущения давления и температуры на земной поверхности в регионе с сейсмической активностью возбуждают атмосферные колебания, активизирующие ионосферу.

Третий механизм состоит в том, что радиоизлучения любого диапазона частот, генерируемые литосферой, распространяются в ионосферу и изменяют ее путем нагрева и ионизации. Однако, согласно [Хаякова, Коровкин, 2011], этот механизм представляется маловероятным по причине слабой интенсивности литосферной электромагнитной эмиссии.

Однако сейсмоионосферные проявления — только часть фундаментальных связей между литосферой, нижней атмосферой и ионосферой, а процессы ионизации и вся цепочка явлений, запускаемая инъекцией радона, связанных с конденсацией, выделением тепла и атмосферным электричеством, может быть обусловлена и другими явлениями, а не только землетрясениями.

К примеру, электрические поля того же масштаба в атмосфере могут генерироваться под воздействием мощных атмосферных фронтов, ионизацией верхних слоев атмосферы галактическими космическими лучами, развитием тропических ураганов и другими, хотя, разумеется, изменение динамики выхода литосферных газов (нестационарность дегазации) является, очевидно, доминирующим фактором. Здесь необходимо выходить из условия, что малое внешнее воздействие со стороны литосферы оказывает влияние на ионосферу — сложную открытую динамическую систему, находящуюся в гранично-нестабильном состоянии. И вопрос в том, как это внешнее воздействие изменяет ее состояние и время на пребывания в них. Примечательно, что все эти явления представляются спорадическими и весьма зависимы от конкретных условий.

Особенность плазменного слоя в верхней атмосфере, находящегося в магнитном поле земного ядра (ионосферы), состоит в том, что в отличие от жидкостей или газов, в которых

обычно существует только один тип возмущений (волн) — звуковые, в такой плазме может реализовываться целый спектр колебаний, например, плазменные продольные колебания ее электронной компоненты, совместные продольные колебания электронов и ионов — ионно-звуковые, верхнегибридные плазменные электронные колебания, ориентирующиеся перпендикулярномагнитному полю и др.

Очевидно, в столь сложной ситуации, помимо проведения исследований конкретных событий, связанных с сейсмичностью, весьма востребованы также статистические исследования корреляции между ионосферными возмущениями и сейсмическими событиями. В этом контексте рядом исследователей высказывается мнение, что предвестники в ионосфере можно идентифицировать лишь с некоторой вероятностью из-за большой изменчивости этой области околоземного пространства, так как имеется часть ионосферных аномалий, которые не сопровождаются сейсмическими событиями даже в спокойных геомагнитных условиях [Perrone et al., 2010].

Однако предложенные модели литосферно-ионосферных связей, согласно [Гуфельд, 2013], не сопоставлялись с процессами подготовки сейсмических событий и не учитывали особенностей поведения поверхностного слоя земной коры, испытывающего воздействие в большей степени фоновых полей различной природы (метеофакторов, приливов, волн удаленной сейсмичности), и поиски каких-либо косвенных признаков прогноза сейсмичности в нем «...не могли дать положительных результатов». Поверхностный ненагруженный слой связан с глубинными процессами только через разгрузку природных газов, и спутниковый мониторинг земной поверхности и приповерхностной атмосферы, в принципе, позволяет обнаруживать эти эффекты.

Таким образом, модель литосферно-атмосферно-ионосферных связей относится фактически к процессам в верхнем полупространстве, запускаемым эскалирующим из верхнего слоя земной коры радоном, и его вариации принципиально важны для всей цепи генерации возможных предвестников. Однако фактически методы спутникового мониторинга ИК-излучений и приповерхностной атмосферы и ионосферы так же, как и методы мониторинга в приповерхностном слое по причине его раздробленности и ненагруженности, являются косвенными, отличаются слабой чувствительностью к глубинным процессам, определяю-

щим сейсмический процесс, и могут носить лишь вспомогательный характер [Гуфельд, 2007, 2013]. Многие из этих явлений носят несейсмическую природу и имеют весьма мало общего с сейсмологией, которая, вообще говоря, дает ключевую информацию о литосфере и процессах в ней. Исследования последних лет свидетельствуют о том, что проблема неоднозначности поведения радона перед сейсмическим событием не может рассматриваться в общем случае вне контекста построения геодинамической модели сейсмичности [Уткин, Юрков, 2010]. И хотя вариации радона, эскалирующего из приповерхностного слоя земной коры, принципиально важны при обосновании комплексных связей в рамках системы литосфера—атмосфера—ионосфера и методов спутникового многопараметрического мониторинга сейсмоопасных территорий, включающего метод «химического потенциала», «ионосферного отклика», длинноволнового ИК-излучения, линейных облачных структур, способного, по мнению авторов [Боярчук и др., 2012], «...обеспечить решающий прорыв в реализации проблемы краткосрочного прогноза землетрясений», такой вывод представляется преждевременным. По меньшей мере было бы ошибочным предполагать, что такой мониторинг открывает только радужные перспективы. Представляется более обоснованным рассматривать динамику эскаляции радона в качестве показателя неустойчивости состояния геосреды, не являющегося предвестником в буквальном смысле, напрямую не связанным с процессами подготовки сейсмического события. Заметим также, что современной сейсмичности соответствует и геосреда, и геофизический процесс.

Геодинамика и спонтанная сейсмическая и электромагнитная активность. Как свидетельствует обширный натурный эксперимент, литосфера генерирует сейсмические колебания в чрезвычайно широком диапазоне частот — от сотен герц до 10^{-4} Гц. Установлено, что относительно низкочастотные возмущения являются собственными колебаниями Земли, частотный спектр которых насчитывает несколько тысяч собственных частот. На эти колебания накладываются сейсмические шумы весьма различной природы (и экзогенного, и эндогенного происхождения) также в широком спектре частот — от долей герца до килогерц [Генштафт, 2009; Чеботарева, 2011]. На границе раздела «земля—воздух», над нею, а также в скважинах наблюдается большое разнообразие электро-

магнитных возмущений весьма различной природы также в исключительно широком диапазоне частот — от 10^{-4} до 10^6 Гц и выше [Левшенко, 1995; Сурков, 2000; Гульельми, 2007]. Стало очевидным, что в широком смысле вопрос о природе сейсмоэлектромагнитных эмиссий литосферного происхождения является фундаментальным и не существует универсальной модели, пригодной и действительной для всех типов эмиссий, генерируемых геосистемой. В частности, электромагнитные эмиссии могут генерироваться как в земной коре, так и на земной поверхности, в атмосфере, ионосфере, магнитосфере и космической плазме. Их природа совершенно различна, а объединение их по признаку «электромагнитное излучение» весьма условно.

В рассматриваемом нами контексте перво-степенный интерес представляет спонтанная эмиссия литосферного происхождения.

Абстрагируясь от деталей, природа спонтанной эмиссии — трансформация собственной энергии геосреды в различные локальные неустойчивые состояния, которые и являются в конечном счете ее источниками. Новая парадигма ее описания состоит в том, что и сейсмичность, и спонтанная электромагнитная эмиссия литосферного происхождения — это продукт непрерывных во времени переходных динамических процессов, связанных с взаимодействием различных подсистем геосреды, их синхронизацией во времени и «конкуренцией» за энергетические ресурсы. Это результат устойчивой переходной активности геосреды, представляющей собой открытую неравновесную систему с конечной во времени плотностью энергетических ресурсов и потоков. В определенном смысле это — метастабильные состояния и устойчивые переходы (или последовательность таких состояний) как ключевые динамические эффекты.

Важно, что эмиссионное излучение, и сейсмоакустическое, и электромагнитное, являются отражением собственной эволюции геосреды, а его спектр отражает стадию этой эволюции. В целом геосистема оказывается способной формировать различные (в том числе, и хаотические) пространственные структуры активности, представляющие собой импульсы и фронты возбуждений, неустойчивость которых ведет к формированию в ней самоподдерживающихся колебаний с определенной пространственной конфигурацией. С экспериментальной точки зрения именно эти фронты возбуждений и связанные с ними фронты самоорганизованной

критичности и являются наиболее энергетически активными и значимыми источниками сейсмоакустического и электромагнитного спонтанного излучения, обладающего упорядоченной пространственно-временной структурой, тесно связанной со строением и динамикой геосреды. В итоге в ней формируется некоторое обобщенное энергетическое (или автоволновое) поле, самоорганизующееся за счет элементарных энергетических полей ее подсистем и элементов. С изменением потока энергии и веществ из низов литосферы в такой системе происходит качественная перестройка сформировавшихся ранее или возникающих в процессе эволюции диссипативных или автоволновых структур. Эти релаксационные (разрывные) автоколебания с частичным сбросом энергии в виде электромагнитной или сейсмоакустической энергии и являются одним из источников изменений (вариаций) естественного импульсного электромагнитного и сейсмоакустического полей, регистрируемых на земной поверхности.

Имеются также весомые основания полагать, что это эмиссионное излучение в свою очередь может быть истолковано в терминах автоколебаний, устойчивость которых (как структурная, так и динамическая) достигается путем многомасштабных корреляций в пространстве и времени. Весьма важно, что диссипативные процессы, как известно, ведут к относительно быстрому «забыванию» системой начальных условий и независимо от их особенностей формируют с течением времени одни и те же или схожие пространственно-временные структуры. В итоге в геосреде формируется собственное сейсмоакустическое и электромагнитное поле эмиссионной природы, эволюционирующее в пространстве и времени, также обладающее упорядоченной структурой. Ясно, что и механизмы распространения спонтанных эмиссий должны быть специфическими, причем определяющую роль здесь должна принадлежать автоволновому распространению. При этом в качестве базового механизма процесса трансформации энергии механической в электромагнитную может быть принято переходное фрактальное рассеивание волны (возмущения) диэлектрической проницаемости на зарядах, сгустках зарядов и диполей, содержащихся в геосреде или возникающих в ней [Гинзбург, Цытович, 1984].

Напомним, что переходным рассеиванием называют процесс излучения в нестационарной среде. Согласно В. Л. Гинзбургу, излуче-

ние заряда может быть связано не только с его ускорением, но и с изменением диэлектрической проницаемости окружающей его среды. При этом любое переходное излучение можно рассматривать как следствие процесса трансформации волны (возмущения) проницаемости с образованием электромагнитных, а в принципе, и других типов волн [Гинзбург, Цытович, 1984].

Обратим внимание на некоторые нетипичные нелинейные явления в структурно-неоднородных средах. Во-первых, это наличие доминантных частот, во-вторых, наличие механизмов, переносящих энергию колебаний в низкочастотную или высокочастотную область спектра. Причина такого явления — во внутренних резонансных свойствах и сильной нелинейности, ответственной за перекачку энергии в эти частоты. Это означает, что принимающий сигнал, прошедший через реальную структурно-неоднородную среду, несет информацию об источнике его генерации и трассе своего распространения. В этом контексте «томографию» спонтанной электромагнитной эмиссии можно рассматривать не только как метод локализации ее источников, но и в более расширенной постановке как общий подход к восстановлению архитектуры геосреды и прогнозу ее поведения путем анализа электромагнитных сигналов, порождаемых самой геосистемой [Шуман, 2012; 2014a]. Важно, что здесь мы имеем дело с новым классом процессов и явлений, которые сегодня востребованы и используются при создании новых технологий и методов зондирующих и мониторинговых систем [Чеботарева, 2011; Шуман и др., 2012].

Геосистемы и мониторинг. Очевидно, для описания многомасштабной структуры и свойств геосреды как диссипативной динамической системы, переходной динамики и поиска критериев близости бифуркаций ее стационарных режимов требуются новые, весьма специфические концепции и методы. Что же нового вносят идеи и подходы нелинейной динамики в решение прикладных задач геомеханики, в частности мониторинга состояния геосреды и проблемы прогноза сейсмичности? Прежде всего, это обоснование в ее рамках наличия широкого спектра процессов и явлений, которые могут быть реализованы и являются типичными для геосистем. В частности, это синхронизация под действием внешнего периодического или случайного воздействия, динамический и стохастический резонанс, авторезонанс, шумоиндуцированные переходы,

перемежаемость как непрерывный переход от регулярного движения к хаотическому. Важно, что геосистема способна формировать различные пространственно-временные структуры активности, некоторое автоволновое поле. Геометрический (спонтанный) шум в такой системе — это универсальный эффект, обусловленный только наличием диффузии. Для систем такого рода типичным является высококоррелированное поведение их подсистем, самоорганизованный характер критичности, которым обладают только многомасштабные иерархически организованные системы, наличие в них медленной динамики, миграции деформационной активности, режимов с обострением. При этом с приближением к критической точке перехода резко возрастает время релаксации отклонений в стационарном состоянии системы и радиус корреляции флуктуаций. В их спектре начинают преобладать низкие частоты.

Фундаментальное свойство геосистем — степенные зависимости распределения сильных сейсмических событий и наличие стадии их подготовки: с приближением к событию происходит аномальный рост флуктуаций и так называемое критическое замедление (эффект резонанса на нулевой частоте), удлинение шкалы времен релаксации, увеличение крупномасштабных флуктуаций при подавлении мелкомасштабных, наличие локальных зон затишья и формирование диссипативных структур (цугов медленных деформационных фронтов). Важно, что эти закономерности и признаки универсальны и, в принципе, подлежат экспериментальной диагностике. С этой точки зрения в качестве ближайшей задачи можно считать организацию мониторинговых наблюдений на иерархических уровнях организации геосистем, развитие адекватных методов обработки массивов получаемых данных, постановки и сочетания активных и пассивных мониторинговых сетей. По причине разнообразия специфических ситуаций и наличия шумов мониторинг должен включать комплексные исследования процессов и состояния геосистем на глобальном уровне — от верхней мантии до поверхностного слоя земной коры, связей коровой сейсмичности с глубинными процессами дегазации, формирования крупномасштабных структур разрушения и контроля их эволюции.

Очевидно, можно предположить, что процессы нарастания низкочастотных мод в спектре шумов геосистемы могут быть эксперимен-

тально диагностированы наземными (в частности, точечными, локальными) наблюдениями, в то время как слежение за ростом обобщенной синхронизации и процессами смены топологии (образа) пространственно-временной «энергетической» структуры спонтанно эмиссионной природы, в определенном смысле изоморфной структуре и динамике геосистем (подсистем) различных уровней и типов организации — задача площадных, в том числе и аэрокосмических мониторинговых систем. В то же время, учитывая требуемую надежность и точность краткосрочного прогнозирования конкретных сейсмических событий, пассивные мониторинговые системы должны быть дополнены активными [Шуман, 2014в].

В этом контексте основные методы многопараметрического аэрокосмического мониторинга предвестников («химического потенциала») ионосферного отклика, линейных облачных структур и другие [Боярчук и др., 2013] ввиду их специфического проявления могут служить, по нашему мнению, в качестве полезного компонента, дополнения к рассматриваемой общей схеме. Но даже в этом случае пока остаются, так сказать «за кадром», и ждут своего решения вопросы энергетики сейсмических событий и миграции их гипоцентров. Однако понятно, что подходы, ограниченные рамками чисто сейсмологических наблюдений или концепциями литосферно-атмосферно-ионосферных связей с использованием исключительно спутниковых технологий и не использующих на количественном уровне сейсмологические данные, не дают повода для оптимизма.

Заключение. Развитие теории динамических систем во второй половине XX в., синтез дробной динамики и фрактальной топологии привели к важным следствиям и в физике, и в ряде геофизических приложений. В частности, на этой основе и с учетом быстрого накопления экспериментальных данных предпринимались многочисленные попытки построения новой концепции функционирования геосреды. Разработана концепция о геофизической среде [Садовский, 2004], суть которой — ее иерархическая неоднородность, активность, нелинейность (физическая, геометрическая, структурная), возможность изменения физических свойств во времени, способность геофизических полей и процессов в ней взаимодействовать между собой. Эти представления о геосреде как нелинейной динамической системе и построенная на этой основе новая концепция геодинамики позволили создать новые

эффективные методы геофизической разведки [Николаев, 2002; Кузнецов, 2009], системы мониторинга природных и природно-техногенных процессов, прогноза сейсмической активности, которые сегодня востребованы и находят широкое применение.

Общие свойства геосреды как нелинейной динамической системы — это свойство самоорганизованной критичности (СОК) и высококоррелированного поведения ее подсистем. При этом пространственная локализация распределения параметров в системе ведет к локализации процесса во времени [Макаров, 2012]. Концепция СОК, которой обладают только многомасштабные иерархически организованные системы, привела к изменению взглядов на динамику таких систем, формулировку условий и критериев разрушения деформируемых твердых тел. Установлено, что разрушению предшествует более или менее длительный подготовительный период. Эта концепция нашла отражение в том, что метастабильность и устойчивые переходы — это ключевые динамические объекты, способные перевести моделирование динамики геосреды на новый уровень понимания и, возможно, прогноза поведения. С этой точки зрения и сейсмичность, и спонтанная электромагнитная эмиссия литосферы — это непрерывные во времени динамические процессы, обусловленные взаимодействием различных подсистем геосреды, их синхронизацией во времени и подавлением одних колебательных мод другими. При этом спонтанная эмиссия является отражением собственной эволюции геосреды, а ее спектр отражает стадию этой эволюции и характеризует меру энергонасыщенности системы. Соответственно, слежение за спектром шумов в системе дает, быть может, самые естественные и доступные для реализации подходы к решению проблем прогноза и прогнозируемости сейсмического процесса, причем спектр сингулярностей в отличие от спектра мощности или корреляционной функции процесса содержит информацию о локальной структуре эмиссионного процесса.

Критические явления в системе обусловлены высокой восприимчивостью: рост восприимчивости и флуктуаций в системе с преобладанием низкочастотных мод наблюдается в условиях близости ее параметров к режиму с обострением, причем этот максимум в спектре пульсаций, в отличие от фликкер-шума, исчезает при удалении параметров системы от точки бифуркации [Руманов, 2013].

Очевидно, в столь сложной динамической системе, как геосреда, мониторинг ее динамики должен осуществляться на иерархических уровнях ее организации и включать комплекс регистрации ее параметров, процессов и состояния на глобальном уровне — от верхней мантии до земной поверхности, изучение связей коровой сейсмичности с глубинной дегазацией, анализа возможностей формирования крупномасштабных структур разрушения и контроля их эволюции. Привлечение дистанционных аэрокосмических методов мониторинга вызвано сложностью объекта исследования, трудностями локализации зон активизации в пространстве и времени, высокой стоимостью масштабных мониторинговых систем. Здесь в центре дискуссий о комплексных связях в системе литосфера—атмосфера—ионосфера стал вопрос о выносе из земных недр инертного, но радиоактивного газа радона, запускающего цепь процессов в этой системе, ответственных за появление различных типов краткосрочных и среднесрочных предвестников землетрясений. Но это не прогноз сейсмического события в его классическом, традиционном смысле. Метод не ориентирован на получение прямых сведений о состоянии геосреды и происходящих в ней процессах. Это, скорее, прогноз и констатация особенностей временной и пространственной динамики радонового поля, развития обусловленного им процесса от поверхности земли до магнитосферы, включая такие параметры, как вертикальный профиль температуры и влажности, и электронной концентрации, локальные параметры ионосферной плазмы, потока инфракрасного излучения, конфигурацию об-

лачного покрова и др. [Пулинец, Узунов, 2011; Боярчук и др., 2012].

Но, как известно, газ радон выделяется в значительных количествах и тогда, когда нет и не предвидится никакой сейсмической опасности, по крайней мере, в краткосрочной перспективе. К тому же соответствующие изменения параметров в рассматриваемой системе литосфера—атмосфера—ионосфера достаточно малы и, вообще говоря, в ряде случаев обнаруживаемы только статистически. В итоге, несмотря на привлекательность спутниковых мониторинговых систем, они не решают проблему достаточно точного и надежного краткосрочного прогноза без должного понимания физики формирования очагов разрушения и закономерностей локализации деформационных процессов в земной коре. При этом трудности решения проблемы прогноза возрастают в связи с синергетическими эффектами в деформационном отклике геосреды на различные внешние и внутренние энергетические воздействия, в частности полей напряжений и диффузионного потока легких газов из низов литосферы, совместного воздействия сигналов и шумов на геосистемы. В столь сложной ситуации пассивный мониторинг весьма перспективно комплексировать с активным, включая контроль восприимчивости геосистем. Очевидно, полученные на его основе экспериментальные данные могут пролить свет и приблизить нас к пониманию физических процессов в геосистеме. Разумеется, и в этом случае сейсмические методы контроля остаются ведущими при диагностике глубинного строения сейсмоактивной области и изменения ее параметров.

Список литературы

- Боярчук К. А., Карелин А. В., Пулинец С. А., Тертышников А. В., Узунов Д. П., Югин 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.
- Бучаченко А. Л., Ораевский В. Н., Похотелов О. А., Сорокин В. Н., Страхов В. Н., Чмырев В. Н. Ионосферные предвестники землетрясений. *Успехи физ. наук*. 1996. Т. 166. № 9. С. 1023—1029.
- Вторая Международная конференция «Новые технологии обработки и использования данных дистанционного зондирования Земли в геологоразведочных работах и при ведении мониторинга опасных геологических процессов». Санкт-Петербург: ФГУП ВСЕГЕИ, 2014. vsegei.ru/ru/conf/summary.
- Геншафт Ю. С. Земля — открытая система: геологические и геофизические следствия. *Физика Земли*. 2009. № 8. С. 4—12.
- Гинзбург В. Л., Цытович В. Н. Переходное излучение и переходное рассеяние (некоторые вопросы теории). Москва: Наука, 1984. 360 с.
- Горный В. И., Тронин А. А. Обзор достижений последнего десятилетия в области применения спутниковых методов дистанционного зондирования при геологических и геофизических исследованиях. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 5. С. 116—132.

- Гульельми А. В. Ультранизкочастотные волны в коре и в магнитосфере Земли. *Успехи физ. наук*. 2007. Т. 177. № 12. С. 1257—1276.
- Гуфельд И. Л. Возможен ли прогноз сильных коровых землетрясений? // *Вестник РАН*. 2013. Т. 83. № 3. С. 236—245.
- Гуфельд И. Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Научное издание. Королев: ЦНИИМам, 2007. 160 с.
- Гуфельд И. Л., 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.
- Дога Л. Н., Степанов И. В., Натяганов В. А. Эмпирическая схема краткосрочного прогноза землетрясений. *Докл. РАН*. 2013. Т. 453. № 5. С. 551—557.
- Журков С. Н., Куксенко В. С., Савельев В. Н., Султанов У. О прогнозировании разрушения горных пород. *Физика Земли*. 1977. № 6. С. 11—18.
- 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.
- Кособоков В. Г. Прогноз землетрясений: основы, реализация, перспективы. Прогноз землетрясений и геодинамические процессы. Ч. 1 (Вычислительная сейсмология. Вып. 36). Москва: ГЕОС, 2005. 179 с.
- Кузнецов О. Л. Эффект АНЧАР — предвестник новой философии геофизической разведки. *Seismic Technology*. 2009. Т. 7. № 1. С. 7—8.
- Левшенко В. Т. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы литосферного происхождения: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва: ОНФЗ РАН, 1995. 36 с.
- Липеровский В. А. Физические модели связи в системе литосфера—атмосфера—ионосфера. Лекции БШФФ. Москва: ИФЗ РАН, 2006. С. 58—65.
- Лоскутов А. Ю. Очарование хаоса. *Успехи физ. наук*. 2010. Т. 180. № 2. С. 1305—1329.
- Любушин А. А. Прогноз Великого Японского землетрясения и сингулярности сейсмического шума. 2013. www.seismicweather.com/download/russian-nature-journal.pdf.
- Макаров П. В. Возможности современных методов геомеханического моделирования в приложениях к задачам наук о Земле. Москва: ИФЗ РАН, 2012. 14 с.
- Наймарк А. А., Захаров В. С. О соотношениях направленности, цикличности и нелинейности в геологических процессах. *Вестник КРАУНЦ. Наука о Земле*. 2012. Вып. 19. № 1. С. 181—189.
- Николаев А. В. Развитие методов нелинейной геофизики. *Вестник ОГГГН РАН*. 2002. № 1(20). С. 34—38.
- 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. № 1. С. 37—51.
- Пилипенко В. А. Волновые геомагнитные поля в космосе и на Земле. 2006. www.kosmofizika.ru/owz/pilipenko/plp1pdf.
- Пулинец С. А., Узунов Д. П. Спутниковым технологиям нет альтернативы. О проблеме мониторинга природных и техногенных катастроф. *Труды Института прикладной геофизики им. акад. Е. К. Федорова*. Москва, 2011. Вып. 89. С. 173—185.
- Рабинович М. И. Пути возникновения и свойства стохастичности диссипативных систем. *Успехи физ. наук*. 1983. Т. 139. Вып. 2. С. 363.
- Рабинович М. И., Мюезиноглу М. К. Нелинейная динамика мозга: Эмоции и интеллектуальная деятельность. *Успехи физ. наук*. 2010. Т. 180. № 4. С. 371—387.
- Родкин М. В., Никитин А. Н., Васин Р. Н. Сейсмотектонические эффекты твердофазовых превращений в геоматериалах. Москва: ГЕОС, 2009. 199 с.
- Руманов Э. Н. Критические явления вдали от равновесия *Успехи физ. наук*. 2013. Т. 183. № 1. С. 103—112.
- Саговский М. А. Геофизика и физика взрыва. Избранные труды. Москва: Наука, 2004. 440 с.
- Соболев Г. А., Пономарев А. В. Физика землетрясений и предвестники. Москва: Наука, 2003. 270 с.
- Сурков В. В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. Москва: Изд. Моск. инж.-физ. ин-та, 2000. 235 с.
- Тарасов В. Е. Модели георетической физики с интегродифференцированием дробного порядка. Москва: РХД, 2011. 568 с.
- Уломов В. И. О глобальных изменениях сейсмического режима и уровня водной поверхности Земли. *Физика Земли*. 2007. № 9. С. 3—17.
- Уткин В. И., Юрков А. К. Радон как индикатор геодинамических процессов. *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 2. С. 277—286.
- Хаякова М., Коровкин Н. В. Сейсмoeлектромагнитные явления как новая область исследования

- радиоволновых явлений. XII Всемирный электротехн. конгресс. ВЭЛК2011, 4—5 октября 2011 г. Доклады и презентации. <http://www.ruscable.ru/article/report/>.
- Чеботарева И. А. Структура и динамика геосреды в шумовых сейсмических полях. Методы и экспериментальные результаты. *Акустика неогорных сред. Ежегодник РАО*. 2011. Вып. 12. С. 147—156.
- Черногор Л. Ф. Солнце—межпланетная среда—магнитосфера—ионосфера—атмосфера—Земля как открытая неравновесная нелинейная физическая система. *Журнал проблем эволюции открытых систем*. 2011. Т. 1. Вып. 13. С. 22—8.
- Шаповал А. Б. Вопросы прогнозируемости в изотропных моделях с самоорганизованной критичностью: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2011. 35 с.
- Шебалин П. Н., Воробьева И. А. Алгоритмы прогноза землетрясений. Прогноз землетрясений и геодинамические процессы. Ч. 2 (Вычислительная сейсмология. Вып. 37). Москва: ГЕОС, 2006. 292 с.
- Шуман В. Н. Нелинейная динамика геосреды: переходные процессы и критические явления. *Геофиз. журн.* 2014а. Т. 36. № 6. С. 129—142.
- 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. Электродинамика фрактальных сред, переходное фрактальное рассеяние и электромагнитный шум литосферы. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 1. С. 3—13.
- Шуман В. Н., Коболев В. П., Старостенко В. И., Буркинский И. Б., Лойко Н. П., Захаров И. Г., Яцюта Д. А. Метод анализа спонтанной электромагнитной эмиссии Земли: физические предпосылки, полевой эксперимент, элементы теории. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 4. С. 40—61.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K., 1987. Self-Organized Criticality: an Explanation of 1/f noise. *Phys. Rev. Lett.* 59, 381—384.
- Perrone L., Korsunova L. P., Mikhailov A. V., 2010. Ionospheric precursors for crustal earthquakes in Italy. *Ann. Geophys.* 28(4), 941—950.
- Tarasov V. E., 2008. Fractional vector calculus and fractional Maxwell's equations. *Ann. Phys.* 323(11), 2756—2778.

Nonlinear dynamics, seismic activity and aerospace sounding systems

© V. N. Shuman, 2015

Processes and phenomena are under consideration, which can be realized from the viewpoint of nonlinear dynamics and are typical for geosystems. Attention is focused on the main features and new possibilities given by the ideas and approaches of nonlinear dynamics for solving applied problems of geophysics. Premises for physical interpretation of spontaneous electromagnetic and seismoacoustic emission as a product of temporally uninterrupted transitional dynamic processes related to interaction of different subsystems of geo-medium as its metastable conditions and succession of such conditions are analyzed. An attempt has been undertaken to analyze lithosphere-atmosphere-ionosphere relations, methods of multiparametric aerospace monitoring of short-term precursors of strong seismic events. Its possibilities and limits are considered and the necessity of integrating passive monitoring systems based on the study of medium-generated emission signals spectra with active ones, oriented to system receptivity control. Baselessness of attempts to give reliable and accurate short-term forecast without studying physics of producing destruction sources and development of deformation process within the Earth's crust during the final stage in a regime with intensification has been noticed.

Key words: spontaneous electromagnetic and seismic acoustic emission, dynamic processes, geosystems, aerospace monitoring.

References

- Boyarchuk K. A., Karelin A. V., Pulinets S. A., Tertyshnikov A. V., Uzunov D. P., Yudin I. A., 2012. Common concept of Oncoming Powerful earthquake Sing Detection within the Framework of Integrated Lithosphere—Atmosphere—Ionosphere—Magnetosphere System. *Kosmonavtika i raketostroyeniye* (3), 21—31 (in Russian).
- Buchachenko A. L., Oraevskiy V. N., Pokhotelov O. A., Sorokin V. N., Strakhov V. N., Chmyrev V. N., 1996.

- Ionospheric precursors to earthquakes. *Phys. Usp.* 39, 959—965 (in Russian).
- Second Int. Conf. «New technologies of processing and use of remote sensing in exploration and in the conduct of monitoring of dangerous geological processes», 2014. St. Petersburg: VSEGEI Publ., (in Russian).
- Genshaft Yu. S., 2009. Earth — an open system: geological and geophysical investigation. *Fizika Zemli* (8), 4—12 (in Russian).
- Ginzburg V. L., Tsytoich V. N., 1984. Transition Radiation and Transition Scattering (some questions of the theory). Moscow: Nauka, 360 p. (in Russian).
- Gornyy V. I., Tronin A. A., 2012. Review of the last decade major achievements of remote sensing methods application on the geological and geophysical problems solution. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* (5), 116—132 (in Russian).
- Guglielmi A. V., 2007. Ultra-low-frequency electromagnetic waves in the crust and magnetosphere of the Earth. *Uspehi fizicheskikh nauk* 177 (12), 1257—1276 (in Russian).
- Gufeld I. L., 2013. Is it possible to forecast strong crustal earthquakes? *Vestnik RAN* 83(3), 236—245 (in Russian).
- Gufeld I. L., 2007. The seismic process. Physical and chemical aspects. Research publication. Korolev: TSNIIMash, 160 p. (in Russian).
- Gufeld I. L., Matveeva M. I., Novoselov O. N., 2011. Why cannot we implement forecast Strong crustal earthquakes. *Geodynamics and tectonophysics*. 2(4). 378—415. (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).
- Zhurkov S. N., Kuksenko V. S., Savelyev V. N., Sultanov U., 1977. Predicting the destruction of rocks. *Fizika Zemli* (6), 11—18 (in Russian).
- Zelenyi 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—850 (in Russian).
- Kosobokov V. G., 2005. Earthquake Prediction: fundamentals, implementation and prospects. Earthquake prediction and geodynamic processes. Part 1 (Computational Seismology. Vol. 36). Moscow: GEOS, 179 p. (in Russian).
- Kuznetsov O. L., 2009. Effect ANCHAR — a harbinger of a new philosophy of Exploration Geophysicists. *Seismic Technology* 7(1), 7—8 (in Russian).
- Levshenko V. T., 1995. Ultra-low frequency electromagnetic signals lithospheric origin: Dr. phys. and math. sci. diss. Moscow, 36 p. (in Russian).
- Liperovsky V. A., 2006. Physical models of lithosphere—atmosphere—ionosphere coupling. Lectures BSFP. Moscow: IPE RAS, 58—65 (in Russian).
- Loskutov A. Yu., 2010. Fascination of chaos. *Uspehi fizicheskikh nauk* 180 (2), 1305—1329 (in Russian).
- Ljubushin A. A., 2013. Forecast Great Japan Earthquake and singularity of seismic noise. <http://www.seismic-weather.com/download/russiannaturejournal.pdf>.
- Makarov P. V., 2012. Capabilities of modern methods of geomechanical modeling as applied to the Earth science. Moscow: IPE RAS Publ., 14 p. (in Russian).
- Naimark A. A., Zakharov V. S., 2012. Ratios of direction, cyclicity and nonlinearity in geological processes. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle* 19(1), 181—189 (in Russian).
- Nikolaev A. V., 2002. Development of methods of non linear geophysics. *Vestnik OGGGN RAN* 1(20), 34—38 (in Russian).
- Panteleev I. A., Plekhov O. A., Naimark O. B., 2013. Model of geomeidia containing defects: collective effects of defects evolution during formation of potential earthquake foci. *Geodinamika i tektonofizika* 4(is.), 37—51 (in Russian).
- Pilipenko V. A., 2006. Wave geomagnetic field in space and on Earth. www.kosmofizika.ru/owz/pilipenko/plp1pdf.
- Pulinets S. A., Uzunov D. P., 2011. Satellite technology there is no alternative. On the problem of monitoring of natural and man-made disasters. *Proc. of the Institute of Applied Geophysics named after academician E. K. Fedorov*. Moscow, Is. 89, 173—185.
- Rabinovich M. I., 1983. Pathways to and Properties of stochasticity in dissipation systems. *Uspehi fizicheskikh nauk* 139(is. 2), 363 (in Russian).
- Rabinovich M. I., Myuezinoglu M. K., 2010. Nonlinear dynamics of the brain: emotion and cognition. *Uspehi fizicheskikh nauk* 180(4), 371—387 (in Russian).
- Rodkin M. V., Nikitin A. N., Vasin R. N., 2009. Seismotectonic effects of solid state transformations in geomaterials. Moscow: GEOS, 199 p. (in Russian).
- Rumanov E. N., 2013. Critical phenomena far from equilibrium. *Uspehi fizicheskikh nauk* 183(1), 103—112 (in Russian).
- Sadovsky M. A., 2004. Selected works: Geophysics and Physics of Explosion. Moscow: Nauka, 440 p. (in Russian).

- Sobolev G. A., Ponomarev A. V., 2003. Physics and fore-runners of earthquakes. Moscow: Nauka, 270 p. (in Russian).
- Surkov V. V., 2000. Electromagnetic effects by earthquakes and explosions. Moscow: MEPI Publ., 235 p. (in Russian).
- Tarasov V. E., 2011. Models of theoretical physics with integrodifferentiation fractional order. Moscow: RHD, 568 p. (in Russian).
- Ulomov V. I., 2007. Of global change of seismic regime and the level of the water surface of the Earth. *Fizika Zemli* (9), 3—17 (in Russian).
- Utkin V. I., Jurkov A. K., 2010. Radon as an indicator of geodynamic processes. *Geologiya i geofizika* 51(2), 277—286 (in Russian).
- Hayakova M., Korovkin N. V., 2011. Seysmoelektromagnitnye phenomenon as a new field of study radio wave phenomena. XII World Electrotechnical Congress. VELK2011, 4—5 October 2011. Presentations (in Russian). <http://www.ruscable.ru//article/report/>.
- Chebotareva I. A., 2011. Structure and dynamics of seismic noise in geomedium fields, methods and experimental results. *Akustika neodnorodnykh sred. Ezhegodnik RAO* is. 12, 147—156 (in Russian).
- Chernogor L. F., 2011. Sun—Interplanetary medium—Magnetosphere—Ionosphere—Atmosphere—Earth as Opened Nonequilibrium Nonlinear Physical System. *Zhurnal problem evolyutsii otkrytyih sistem* 1(is. 13), 22—48 (in Russian).
- Shapoval A. B., 2011. Questions predictability in the isotopic model with self — organized criticality: author's abstract. Dr. phys. and math. sci. diss. Moscow, 35 p. (in Russian).
- Shebalin P. N., Vorobyov I. A., 2006. Earthquake prediction algorithms. Earthquake prediction and geodynamic processes. Part 2 (Computational Seismology. Vol. 37). Moscow: GEOS, 292 p. (in Russian).
- Shuman V. N., 2014a. Nonlinear dynamics of geomedium: transitional processes and critical phenomena. *Geofizicheskiy zhurnal* 36 (6), 129—142 (in Russian).
- Shuman V. N., 2014b. On predictability 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., 2012. Electrodynamics of fractal media, transitional fractal dispersion and electromagnetic noise of the lithosphere. *Geofizicheskiy zhurnal* 34(1), 3—13 (in Russian).
- Shuman V. N., Kobolev V. P., Starostenko V. I., Burkin-sky I. V., Loyko N. P., Zakharov I. G., Yatsyuta D. A., 2012. A method of analysis of spontaneous electromagnetic emission on the Earth: physical backgrounds, elements of theory, field experiment. *Geofizicheskiy zhurnal* 34(4), 40—61 (in Russian).
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K., 1987. Self-Organized Criticality: an Explanation of 1/f noise. *Phys. Rev. Lett.* 59, 381—384.
- Perrone L., Korsunova L. P., Mikhailov A. V., 2010. Ionospheric precursors for crustal earthquakes in Italy. *Ann. Geophys.* 28(4), 941—950.
- Tarasov V. E., 2008. Fractional vector calculus and fractional Maxwell's equations. *Ann. Phys.* 323(11), 2756—2778.