

Сейсмический процесс и современные мониторинговые системы

© В. Н. Шуман, 2014

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина
Поступила 25 марта 2014 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

У межах відомих поглядів на геосередовище як відкритої ієрархічно неоднорідної нелінійної динамічної системи розглянуто питання прогнозованості сейсмічного процесу та його реалізації на основі даних сучасних моніторингових систем. Проаналізовано процеси самоорганізації та механізми формування вогнищ руйнації в земній корі, можливості їх прогнозу, генерації спонтанного сейсмoeлектромагнітного шуму та одержання інформації про властивості геосередовища, умови його деформування, а також пошуку можливих провісників активної стадії руйнації. Підкреслено, що моніторингові дослідження потрібно вести на комплексній методичній основі з урахуванням активної ролі геосередовища та особливих його динамічних станів, масштабнo-інваріантних особливостей розвитку сейсмічного процесу з ініціюванням дисипативних структур загострення, зокрема породжуваних кооперативною поведінкою його підсистем. Обговорено роль і значення активного моніторингу стану геосередовища, включаючи контроль його збудження, пошуку ефектів синхронізації, розвитку спеціальних засобів спостереження та аналізу даних.

Ключові слова: геосередовище, сейсмічний процес, моніторингові системи, провісники руйнування, динамічні системи.

Введение. В предыдущих работах [Шуман, 2011; 2013а,б] отмечены некоторые итоги и результаты применения нелинейно-динамического подхода к прогнозу, прогнозируемости сейсмического процесса и разработки его феноменологической модели. При этом возможность прогноза и прогнозируемость базируются на осознании и убежденности типичности поведения нелинейных динамических систем. Как известно, основные свойства геосреды как динамической системы — диссипативность динамики, компенсация энергетических потерь за счет действия внешних и внутренних источников, активность ее отдельных элементов (блоков различного ранга). Она не может больше рассматриваться в качестве пассивного континуума, ей оказалась присуща внутренняя самоподобная структура, во многом определяющая природу и характер сейсмического процесса. В геосреде реализуются комплексы нелинейных взаимодействий между физическими полями, структурами и подсистемами, а мультифрактальность может рассматриваться как достаточно распространенное явление. Очевидно, в этой ситуации разработка адекватных моделей геосреды и моделирование закономерностей

развития сейсмического процесса оказываются тесно связанными между собой.

Заметим, что природа сейсмичности рассматривалась во всех основополагающих работах по физике Земли. Как известно, со времени выхода первых работ Ф. Рейда и Ч. Рихтера было разработано множество моделей по физике и динамике очаговых зон и сейсмического процесса в целом. В этой области исследований сложились известные научные школы М. Садовского, В. Кейлис-Борока, Т. Рикитак, В. Страхова, Г. Соболева и других исследователей.

Удачное, по мнению автора, изложение состояния данной проблемы по состоянию на 2007 г. приведено в известных работах Ю. Ребецкого [Ребецкий, 2007а; б] и И. Гуфельда [Гуфельд, 2007]. Большой резонанс среди геофизиков вызвала концепция самоорганизованной критичности (СОК) П. Бака, ориентированная на описание эволюции самоподобных диссипативных открытых систем, к которым может быть отнесена и геосреда.

Несомненно, в целом синергетическая концепция способствовала пониманию и конкретизации целей и задач прогнозных исследова-

дований. И тем не менее проблема прогноза сейсмичности, в частности прогноза сильных событий, оказалась существенно сложнее, чем это казалось еще 5—10 лет назад. При этом наибольшие затруднения возникают с предсказанием времени их поступления. Неудачи последних лет на этом пути, понимание сложности проблемы, казалось бы, не прибавляют энтузиазма в ее исследовании. Однако в самое последнее время мы являемся свидетелями резкого возрастания интереса к задаче прогноза землетрясений (см., например, [Макаров, 2011; Трофименко, 2011; Гуфельд и др., 2011; Николаевский, 2011; Шаповал, 2011; Шуман, 2011; Страхов, Савин, 2013а—в; Гуфельд, 2013; Пантелеев и др., 2013; Шуман, 2013а,б; Бучаченко, 2014 и др.]). И дело, очевидно, здесь не в «патологическом интересе к прогнозу» по образному выражению Ч. Рихтера, а в актуальности и важности проблемы, новых возможностях ее анализа в свете современных концепций возможных механизмов формирования очагов будущего разрушения, идей иерархичности и многомасштабности деформационных процессов — базовых идей физической мезомеханики и нелинейной динамики, связи коровой сейсмичности с глубинной дегазацией, учета структуры и временных изменений параметров геосреды. Очевидно, однако, что и традиционные подходы, и в значительной степени новые концепции описания все еще не соответствуют реальной сложности процессов в геосреде, определяющих механизмы генерации землетрясений. Эти идеи и концепции, однако, не получили повсеместного признания, поскольку полученные на их основе результаты все еще достаточно скромны, во многом носят абстрактный характер и остаются неясным, в какой степени данные конструкции имеют отношение к реальности. К сожалению, большинство понятий из этих областей исследований сильно формализовано и нередко их физический смысл теряется или ускользает за завесой абстрактных рассуждений и терминов.

Наша задача — обратить внимание на важные с нашей точки зрения аспекты теории, отдельные ее фрагменты и попытаться представить себе, как могут выглядеть вещи, если перестать притязать на теорию, акцентируя, в основном, внимание на физической стороне дела.

Как известно, теория имеет дело с идеализированной системой, а эксперимент — с реальной. Напомним, что согласно Р. Фейнману, у нас всегда есть возможность опровергнуть

теорию, однако мы практически никогда не можем доказать, что она верна.

Может оказаться уместным и следующий вопрос: невозможность предсказывать результаты, вообще говоря, это достоинство или недостаток? Как известно, сегодня нелинейная динамика лишила нас иллюзии глобальной предсказуемости, но она позволила увидеть и принципиальные трудности, и новые возможности решения проблемы. В частности, остаются неразработанными проблемы многоуровневой самоорганизации и учета нелинейности иерархически организованной системы. Не существует общепризнанной механической модели сейсмического процесса, физики и природы быстрой изменчивости параметров геосреды, генерации и распространения спонтанного сейсмоакустического и электромагнитного шумов литосферы, совместного воздействия периодических сигналов и шумов на нелинейные системы, процессов деформации и разрушения геосреды. Другой важный аспект проблемы — возможности поиска реальных предвестников сейсмических событий как части единого сейсмического процесса и анализ особенностей используемых в настоящее время методов его мониторинга. Очевидно, основой этих экспериментальных исследований может служить только должное понимание процессов, протекающих в литосфере. Приблизить и конкретизировать постановку задачи мониторинга, ориентировать его на получение необходимых сведений о состоянии геосреды и протекающих в ней процессах, обратить внимание на ее своеобразие и возможности экспериментальной реализации и является основной задачей настоящей статьи.

Состояние вопроса. Приведем некоторые известные положения общего характера, важные с точки зрения решения поставленной задачи. Согласно [Садовский, 2004; Генштафт, 2009], для Земли можно установить пространственно-временную иерархичность состава, структуры и процессов. При этом приходится рассматривать процессы в дискретной (блочной) среде и считать среду многофазной, т. е. учитывать ее твердую, жидкую и газовые компоненты.

Геосреда — хороший пример открытой, энергетически насыщенной нелинейной диссипативной системы со множеством самоорганизующихся структур (взаимодействующих отдельностей по терминологии М. А. Садовского). Она непрерывно подвергается действию разномасштабных внешних и внутренних сил. Обычно под внешними силами подразумевают

ся эволюция приливных деформаций в системе Земля—Луна—Солнце, а под внутренними — широкий спектр физико-химических процессов в системе ядро—мантия—литосфера. В качестве основного переменного фактора, определяющего текущую нестабильность среды вблизи состояния, близкого к критическому, может служить восходящий поток легких газов (водород, гелий и др.), а изменчивость ее параметров, которая может быть весьма быстрой, является результатом его непрерывного взаимодействия с твердой фазой литосферы [Гуфельд, 2007].

В геосреде постоянно идут необратимые диссипативные процессы (диффузия, химические реакции, фазовые переходы), существуют комплексы нелинейных взаимодействий между физическими полями, структурами и подсистемами. Источник энергии в ней локализован и распределен по всей системе.

Установлено, что диссипативные твердотельные структуры, самоорганизующиеся в открытых системах такого типа и формирующиеся в условиях диссипации, являются фрактальными. При этом движущей силой самоорганизации в диссипативных системах рассматриваемого типа является стремление вещества к снижению энтропии, а представления об автоволновых механизмах самоорганизации в активных средах приобретают в последние годы достаточно широкое распространение. Автоволны — яркий пример диссипативной структуры, имеющей непосредственное отношение к самоорганизации в геосреде как открытой неравновесной системе с множеством самоорганизующихся структур, а мультифрактальность может рассматриваться как достаточно общее явление.

Геосреда как нелинейная динамическая система обладает свойством самоорганизованной критичности. В ней нельзя выделить статические независимые масштабы. Экспериментально и теоретически установлены длиннокорреляционные многомасштабные взаимодействия, наличие медленной динамики, в частности обнаружение волн «маятникового» типа, ответственных за передачу колебаний в системе массивных блоков и более податливых прослоек, других волновых эффектов, обязанных своим происхождением дискретности геосреды. Существенно, что временные задержки в связях между элементами геосистемы могут приводить к существенному изменению и усложнению ее коллективной динамики (динамики ансамбля). В частности, при существенном запаздывании

в геосистеме возникают новые динамические свойства, такие как увеличение длительности переходных процессов, рост областей мультистабильности и появление ее новых типов. Отмечается большая роль запаздывания в синхронизации автоколебаний. Развитие катастрофических событий возможно лишь при согласованном поведении различных частей геосистемы.

Еще одна важная сторона рассматриваемой проблемы — наличие шумов в системе. В частности, отклик геосреды на внешнее воздействие может быть различным в зависимости от условий самовозбуждения в данный конкретный момент времени. Источники шума в такой системе могут индуцировать принципиально другие режимы функционирования, которые не могут быть реализованы в отсутствие шума. Шум может вызывать рост степени порядка в системе [Анищенко и др., 1999]. Характерный пример — поведение нелинейной системы при воздействии шума — эффект стохастического резонанса (СР). При этом достаточно наличия шума любой интенсивности, чтобы в ансамбле наблюдался эффект СР, который может интерпретироваться в качестве фундаментального порогового эффекта. Иначе говоря, воздействие шума может привести к реализации случайных переключений между сосуществующими аттракторами системы [Анищенко и др., 1999; Лоскутов, 2010]. Синхронизация — один из важных нелинейных эффектов, сопровождающих СР. Представляет интерес проблема синхронизации ансамбля (системы блоков геосреды) внешним, возможно периодическим, сигналом при заданном уровне шума. В ансамбле эффект СР может быть существенно усилен. Напомним, что геосреда — релаксационная система, поэтому резонанс в обычном его физическом понимании в ней невозможен.

Яркий пример диссипативной структуры, имеющей непосредственное отношение к самоорганизации в геосреде — автоволны. Как известно, энергия автоволной не переносится, а высвобождается. В однородной активной среде ее скорость распространения, длина и форма сохраняются и не зависят от начальных и граничных условий. В неоднородных активных средах автоколебательная система содержит свой спектр собственных стоячих волн, хотя возможна и бегущая автоволна. При этом вследствие порогового эффекта неоднородные активные среды могут гасить автоволновые процессы, а хаос является неизбежным атрибутом их жизни.

Итак, основные свойства диссипативной геосистемы, в которую поступает энергия, определяются составом и типом ее структурных элементов, притоком энергии и факторами внешней среды. Другая важнейшая сторона вопроса — это проблема прогноза разрушения нелинейных деформационных систем, генерации сейсмoeлектромагнитного шума как с точки зрения изучения закономерностей и механизмов его генерации, так и получения информации о свойствах геосреды, условиях ее деформирования и прогноза сейсмичности.

Процессы самоорганизации и механизмы формирования очагов разрушения. На протяжении достаточно длительного времени в теории разрушения твердых тел доминировала кинетическая концепция усталостного разрушения С. Н. Журкова [Журков, 1968]. Это статистическая по своей природе теория, направленная на оценку некоего «среднего срока жизни» нагружаемой среды, развитая в рамках линейных приближений механики сплошной среды (макромасштабный уровень) и физики деформационных дефектов в нагруженном твердом теле (микромасштабный уровень). Очевидно, из такого представления о механике довольно естественно следует механистический подход к процессам разрушения и развития очага землетрясения без учета «блочного аспекта» устройства реальной структуры геосреды. Однако в последние годы в самой механике взгляды существенно изменились. На передний план вышла эволюционная концепция разрушения, которая, в отличие от традиционного критериального подхода феноменологической макроскопической механики разрушения, основанного на макроскопическом масштабе усредненного описания, опирается на идеи иерархичности и многомасштабности деформационных процессов [Марков, 2008]. Существенно, что степенные законы распределения являются фундаментальным свойством эволюции большинства многомасштабных иерархических нелинейных систем, в частности геосреды [Макаров, 2011]. У открытых систем такого типа (систем с диссипацией) фазовое пространство можно представить себе разделенным на области притяжения к различным аттракторам — равновесию, периодическим колебаниям или странному аттрактору. Одним из них может быть разрушение системы [Кадомцев, 1994]. Как известно, в сложных физических системах со многими аттракторами может развиваться процесс упорядочения, который и получил название самоорганизации. Идеи

о самоорганизации и образовании диссипативных структур в открытых системах такого типа оказались очень важными для того, чтобы перебросить мост между физикой, механикой и геофизикой. В частности, здесь в качестве примера можно привести широко известную концепцию прогноза сейсмичности, предложенную В. И. Кейлис-Бороком, основанную на идеях нелинейной динамики иерархических диссипативных систем.

Стала очевидной необходимость рассмотрения деформационного твердого тела в качестве многоуровневой иерархически организованной системы, которая должна описываться в рамках нелинейной механики. На передний план вышли проблемы многоуровневой самоорганизации и учета нелинейности иерархически организованных систем, роли нелинейных волн и пластической деформации в разрушении твердых тел [Панин и др., 2012]. Нельзя не увидеть здесь попыток учета реальных физических процессов в геосреде и ее реальной блочно-иерархической структуры. Понятно, что пространственно-иерархическая структура дефектов литосферы определяет существенную неоднородность полей напряжения разного масштаба и оказывает влияние на способ и величину диссипации накопленной упругой энергии.

На основе этих представлений предприняты попытки построения новой обобщенной модели развития сейсмического процесса (очага землетрясения) как результата эволюции дефектов геосреды на различных масштабных уровнях в поле внешних напряжений, позволяющей описать основные способы релаксации напряжений массивами горных пород; хрупкое крупномасштабное разрушение и катаклическое деформирование, являющихся следствием коллективного поведения дефектов [Пантелеев и др., 2013]. Теоретически обосновано предположение о возникновении локализованных диссипативных структур с обострением в локализованной пространственной области, уменьшающейся с течением времени — очага хрупкого разрушения. При этом любое макроскопическое разрушение есть необходимый катастрофический этап эволюции геосреды — режим с обострением на соответствующем пространственно-временном масштабе [Марков, 2008].

По мнению авторов [Пантелеев и др., 2013], эта модель подготовки потенциального очага землетрясения соответствует и является формализованным обобщением лавинно-трещинной модели [Мячкин и др., 1975], однако

приближенной в направлении учета реального строения геосреды, которая отличается от классических моделей сплошной среды структурой и постоянным расходом поступающей извне энергии.

Предпримем попытку конкретизации некоторых аспектов проблемы механики очага сейсмического события, опираясь на результаты цитируемых выше работ. Очевидно, в соответствии с этими результатами очаг можно определить как область локализации пространственно-временных сильнонеравно-весных состояний, деформаций и повреждений, формирования деформационных фронтов различных масштабов, волн повреждений и разрушения, являющихся результатом эволюции иерархически структурированной нелинейной многоуровневой динамической системы (геосреды) с самоорганизованной критичностью. Предполагается, что непосредственно перед образованием крупномасштабной разрывной структуры в земной коре формируется некая специфическая первичная структура, состоящая из локальных прочных образований и областей сдвиговой ползучести, а квазихрупкому разрушению предшествуют интенсивные вязкопластические процессы и образование фронтов дефектности. Отсюда непосредственно следует актуальность изучения зон локализованной пластической деформации, развитие которых непосредственно предшествует разрушению [Макаров, 2011; Панин и др., 2012; Пантелеев и др., 2013]. Важность этого результата очевидна: завершающая стадия разрушения обнаруживает черты, характерные для поведения нелинейных систем в окрестности критических точек, а выполнение масштабно-инвариантных закономерностей развития сейсмического процесса является следствием автомодельного характера поврежденности на завершающей стадии разрушения [Пантелеев, 2010]. При этом автомодельность процессов накопления неупругих деформаций (повреждений) во всей иерархии масштабов обуславливает качественное подобие сценариев разрушения независимо от масштабов деформационного процесса и геологических свойств среды [Макаров, 2011], а саморазрушение связано с волновым структурно-фазовым распадом материала геосреды. Канализованное распространение трещин в многоуровневых системах также развивается как нелинейный волновой процесс.

Таким образом, любое макроразрушение — это режим с обострением на соответствующем

масштабе и физически означает прорыв разрушения с меньших масштабов на большие, а начало интенсивной подпитки локальной области деформационными фронтами можно считать началом режима обострения. Ясно, что он должен сопровождаться всплесками, нарушением стационарного режима сейсмоакустической и электромагнитной эмиссий, формированием зон «затишья» — сравнительно низкоамплитудного непрерывного квазистационарного процесса нарастания деградации в локальной зоне формирующегося очага. Именно это обстоятельство вселяет оптимизм в плане обоснования поисков физических предвестников катастроф и перевода их в практическую плоскость.

Разумеется, энергетическая и флюидная подпитки системы вызывают увеличение ее неравновесности и неустойчивости, что ведет к формированию флуктуаций. Слабый шум, присущий всякой реальной системе, усиливается, формируется резонанс на нулевой частоте. Приближение к бифуркации стационарного режима системы отражается в нарастании низкочастотных мод в спектре ее шумов.

Очевидно, приведенные соображения о формировании очага все же следует ограничить коровой частью литосферы. Как известно, при моделировании напряжений и деформаций крупных тектонических объектов обычно используют тело Кулона—Мора для горных пород хрупкой части земной коры и тело с нелинейной ползучестью для горных пород в пластической ее части и в подкоревой литосфере. И здесь физика сильных разрушений представляется более-менее понятной. Модель поведения геосреды с дефектами в поле внешних напряжений, отличающейся предельной энергонасыщенностью, собственной динамикой и изменением параметров на разных масштабных уровнях, в принципе позволяет описать основные способы релаксации напряжений массивами горных пород. Это — хрупкое крупномасштабное разрушение и катакластическое деформирование, являющиеся следствием коллективного поведения дефектов, определяемого величиной структурного скейлинга [Пантелеев и др., 2013]. И тем не менее эта модель все же остается весьма механистической. В ней не конкретизируются движущие силы процесса, практически не рассматривается природа слабой сейсмичности и повторяемости крупномасштабных разрывов в одних и тех же местах, реализующихся в граничных структурах. Их цикличность также остается открытой, на

что обращено внимание в работах [Гуфельд и др., 2011; Гуфельд, 2013]. По мнению И. Л. Гуфельда, это означает, что суть сейсмического процесса должна быть иной, иметь другой физический смысл. В частности, важная особенность геосреды, которая не моделируется при нагружении монолитных образцов в лабораторных экспериментах — это быстрые и разномасштабные вариации объемно-напряженного состояния, интерпретируемые в качестве реакции геосреды на взаимодействие восходящих потоков легких газов (водород, гелий) с твердой ее фазой [Гуфельд, 2007]. Существенно, что газонасыщенная геосреда допускает проявление процессов, которые не реализуются в иных условиях. В определенной степени можно говорить об определяющей роли водородной дегазации в формировании особенностей структуры литосферы. При этом любая локализованная по глубине ее зона при взаимодействии с восходящим потоком легких газов будет испытывать вариации объема: сжатие—растяжение. Фактически можно говорить о режиме деформационной волны, распространяющейся в направлении потока легких газов при его модуляции [Гуфельд, 2013]. Сток легких газов из разнесенных по глубине трещиноватых зон блоковых структур в межблоковые ослабленные зоны может быстро менять сейсмические ситуации от фоновых до критических. Декомпрессия разломной зоны под влиянием или воздействием внешних факторов вызывает взрывной распад соединений гелия и водорода с выделением энергии высокой плотности. Имеются весомерные основания предполагать, что декомпрессия и дегазация и сопровождающие их деформационные фронты, сходящиеся в области формирующегося очага наряду с наличием медленной динамики (динамических скоррелированных процессов, существенно более медленных, чем волны напряжений), вносят значительный вклад в формирование крупномасштабного разрыва. При этом, если создать условия каналированного распространения трещины и максимально локализовать эффекты диссипации, то трещина будет распространяться как нелинейный волновой процесс.

Сейсмоакустическая и электромагнитная эмиссии литосферы и возможные предвестники активной стадии разрушения. Как известно, представление об активных средах, характеризующихся распределенным ресурсом энергии, вещества и информации, автоволновым механизмом самоорганизации и способных,

в силу специфики структуры и внутренних взаимодействий, формировать регулярные во времени и пространстве структуры, были привнесены в геофизику в 60-е годы XX века из физики лазеров. Было показано, что любое разрушение твердого тела (и хрупкого, и пластического), как и сам сейсмический процесс, является результатом эволюции многомасштабной иерархически организованной нелинейной динамической системы [Макаров, 2011]. В рамках таких представлений наблюдаемые вариации геофизических полей могут интерпретироваться в качестве проявления бифуркаций в геосреде при ее переходе из одного состояния в другое или, конкретнее, в качестве проявления детерминированного хаоса в иерархически структурированной фрактальной среде. При этом эмиссионное сейсмоакустическое и электромагнитное излучение является отражением собственной эволюции геосреды, а его спектр отражает стадию этой эволюции.

Одна из моделей описания флуктуаций сейсмоакустической и электромагнитной эмиссии в процессе перестройки структуры пород под воздействием восходящих потоков легких газов связана с перколяционной моделью диффузионного фронта. При этом отмечается, что модель фронта градиентной, скалярной перколяции внедрения позволяет дать физическую интерпретацию наблюдаемых параметров высокочастотного спонтанного шума как неравновесного самоорганизованного явления [Гийон и др., 1991]. Существенно, что эксперимент допускает автоволновую трактовку происходящих в геосреде процессов, типичность их хаотического поведения, демонстрирует стабильную во времени картину пространственного распределения энергии сейсмических и электромагнитных шумов литосферного происхождения и возможность локализации их источников [Чеботарева, 2011; Шуман, 2014]. При этом каждый из элементов системы генерирует последовательность импульсов возбуждения с различным интервалом следования. Весьма вероятно, что сейсмоакустический и электромагнитный шумы могут быть истолкованы в терминах автоколебаний, поддерживаемых внешними источниками энергии в нелинейной диссипативной системе (геосреде), вид и свойства которых определяются самой системой [Дмитриевский, Володин, 2006]. При этом достаточно располагать источником энергии, чтобы самовозбуждение колебаний стало возможным, а само образование пространственно-связанной структуры блоков

в значительной степени зависило и определялось интенсивностью и скоростью процессов дегазации, а также уровнем внешних полей и шумов в данный период времени. Следует также предусмотреть возможность различного физического содержания автоволновых процессов на разных уровнях геометрически самоподобной блоковой системы, в частности генерации связанных акустоэлектромагнитных возбуждений в диапазоне Гц—кГц [Дмитриевский, Володин, 2006]. Заметим также, что в соответствии с флуктационно-диссипативной теоремой физики явление генерации геометрического (акустосейсмоэлектромагнитного) шума — это универсальный эффект. Он обусловлен только наличием диффузии и может проявляться при генерации возмущений различной природы. Ясно, что использование лишь классических подходов к механизмам генерации и распространение возмущений в реальных средах (литосфере) не всегда информативно и целесообразно в смысле понимания физики происходящих в геосреде динамических процессов и их прогноза.

Как уже отмечалось, начало интенсивной подпитки локальной области деформационными фронтами, обусловленными в том числе и импульсными потоками легких газов на разных пространственных и временных масштабах геосистемы при максимальной локализации диссипации, в определенном смысле можно считать началом режима обострения и перехода разрушения (формирования крупномасштабного разрыва) в катастрофическую стадию. При этом наличие локальных зон затихья и формирования локализованных диссипативных структур обострения (медленных деформационных фронтов и волн), по мнению П. Макарова [Макаров, 2011], можно считать надежным предвестником формирования очага как зоны локальных структурных превращений. Предполагается, что непосредственно перед образованием крупномасштабной разрывной структуры в некотором объеме геосреды образуется специфическая первичная структура — зона неравновесных состояний, состоящая из прочных областей и области сдвиговой ползучести.

Как известно, главный физический процесс на движущихся фронтах состоит в рождении энтропии. Существенно, что генерируемые и излучаемые из этих областей (деформационных, диффузионных фронтов) сейсмоакустические и электромагнитные возмущения могут быть зарегистрированы экспериментально.

Экспериментально установлено, что при приближении к критической точке (точке бифуркации) начинают быстро расти время релаксации флуктуаций системы и радиус их корреляции. При этом основную роль начинают играть крупномасштабные флуктуации, чей рост происходит на фоне увеличения восприимчивости системы к разного рода внешним воздействиям (возмущениям) [Руманов, 2013].

Напомним, что восприимчивость — это отношение амплитуд изменения состояния системы и состояния системы. Слабый шум, присущий всякой реальной системе, усиливается. В итоге появляется возможность говорить о приближении к точке бифуркации стационарного режима по нарастанию низкочастотных мод в спектре шумов системы. В этом контексте имеются весомые основания обратить внимание на такой существенный недостаток имеющихся теорий прогноза сейсмичности, как игнорирование или недооценка шумов в исследуемой геосистеме, процессов синхронизации автоколебаний в ее подсистемах (кластерной синхронизации), в том числе синхронизации, индуцированной шумом. С этой точки зрения представляется естественным исследование отклика такой блочной геосистемы на многочастотные и шумовые воздействия. Возникает возможность осуществления мониторинга геосистемы, варьируя частоту внешнего воздействия в зависимости от амплитуды колебаний. Следовательно, эффективный мониторинг текущего ее состояния может быть реализован на основании индекса возбудимости геосистемы, который и определяет меру возбудимости колебаний или движений в ней [Фрадков, 2005]. Важно, что индекс возбудимости может быть измерен экспериментально подобно тому, как измеряется обычная частотная характеристика линейной системы. Однако в отличие от измерения частотной характеристики, когда на вход системы подается гармоническое воздействие с постоянной амплитудой и изменяющейся частотой, при измерении характеристики возбудимости изменяется амплитуда (уровень) входного сигнала, при этом сам сигнал (импульс возбуждения) задается в виде обратной связи [Фрадков, 2005].

Разумеется, это подразумевает контролируемое воздействие на систему внешним и, возможно, достаточно мощным источником практически в непрерывном режиме эксперимента, что на практике может оказаться весьма проблематичным или трудно реализуемым. Ситуация усложняется тем обстоятельством, что в

сложных динамических нелинейных системах, к числу которых может быть отнесена и геосреда, необходимо осуществлять такой мониторинг и контроль на иерархических уровнях их организации, что весьма непросто. Однако на практике в ряде случаев эта процедура не является необходимой, если вспомнить о наличии шумов в любой реальной системе: с приближением к точке бифуркации наблюдается возрастание времени релаксации флуктуаций и их радиус корреляции, причем этот максимум в спектре ее шумов (резонанс на нулевой частоте по терминологии Э. Руманова), в отличие от фликкер-шума, быстро исчезает при удалении параметров системы от критических. Заметим также, что фликкер-шум монофрактален. При этом форма распределения энергии по частотам

$$S(f) \sim f^{-\beta}, \quad \beta \approx 1$$

указывает на возможность появления в системе гигантских флуктуаций и долговременный прогноз поведения системы в этом случае становится невозможным [Малинецкий, 1998].

Заметим, что в реальности процессы в геосреде мультифрактальны, т. е. допускают разложение на участки с различными локальными свойствами скейлинга ($\beta \neq \text{const}$), что, вообще говоря, усложняет мониторинг и диагностику поведения низкочастотных мод в спектре ее шумов.

Таким образом, предельно ясно, что мониторинговые исследования должны вестись на комплексной методической основе, учете активной роли геосреды и особых ее динамических состояний, масштабно-инвариантных закономерностей развития сейсмических событий с иницированием диссипативных структур обострения, в том числе порождаемых кооперативным поведением ее подсистем. Очевидно, к такой постановке мониторинговых наблюдений мы все еще не готовы. До сих пор все еще предполагается, что наибольшее значение для поиска предвестников крупномасштабного разрушения имеют исследования в приповерхностном слое земной коры, в эпицентре события. Но, как известно, поверхностный слой земной коры не нагружен. На него оказывают сильное влияние внешние источники. В итоге исследование деформационных процессов в этом приповерхностном слое весьма слабо и опосредствованно отражает распределение деформаций, связанных с накоплением и релаксацией напряжений во

внутренних частях геосреды. Согласно И. Гуфельду [Гуфельд и др., 2011; Гуфельд, 2013], поверхностный слой связан с глубинными процессами только через разгрузку природных газов, а не с процессом формирования крупномасштабных структур разрушения. В итоге в условиях неоднородной иерархически блоковой структуры земной коры поиск каких-либо косвенных признаков прогноза сейсмичности в этом раздробленном и ненагруженном слое вряд ли целесообразен и эффективен. Мало эффективными оказались и методы спутникового мониторинга: «...за тридцать лет спутникового мониторинга ионосферной плазмы не обнаружено аномалий, которые можно было бы отнести к предвестникам (ситуация аналогична результатам поиска литосферных предвестников)» [Гуфельд и др., 2011]. Следовательно, можно предположить, что хотя в основе мониторинга сейсмичности и присутствует широкий спектр геофизических и гидрогеохимических методов, методов анализа сейсмичности в пространстве, спутникового мониторинга земной поверхности и приземной атмосферы, в частности инфракрасного излучения с целью обнаружения эффектов разгрузки литосферы природными газами, как и методы мониторинга в приповерхностном слое они являются косвенными и в известной степени неадекватными задачам прогноза динамики и состояния геосреды. В столь сложной ситуации на передний план, как уже упоминалось, выходят методы активного мониторинга геосреды, включая контроль ее активности (возбудимости), поиска эффектов синхронизации и ее разрушения, изучение баланса притока, оттока и внутреннего производства энтропии, роли запаздывания в синхронизации автоколебаний, использование и развитие специальных средств наблюдения и анализа данных с целью получения такой информации. Проблема, однако, состоит в том, что ее получение в реальной геосреде весьма непросто, требует постановки специальных мониторинговых наблюдений, к чему геофизики не вполне готовы.

Самоорганизация и энтропия. В предыдущих разделах внимание было сосредоточено на одной из важнейших с точки зрения приложений характеристик равновесия в геосистеме — ее восприимчивости. В частности, отмечалось, что критические явления в системе обусловлены восприимчивостью, а синхронизация означает приближение к критическому событию. Однако в значительной степени остались «за

кадром» такие важные вопросы, как роль энтропии в открытых системах, связь негэнтропии и информации, приложения выводов этой теории к изучению геосистем и прогнозу их поведения.

Как известно, именно приток негэнтропии (энтропии с обратным знаком, отрицательной энтропии) поддерживает систему в неравновесном состоянии [Мартынов, 1996; Изаков, 1997, Климонтович, 1999]. Этот приток является мерой всех физико-химических диссипативных процессов, происходящих в исследуемой системе. Поток энтропии состоит из кондуктивной, конвективной и диффузионной частей. При этом изменение энтропии открытой системы ds определяется ее изменением за счет притока из окружающей среды (например, низов литосферы) ds_e и ее увеличения за счет внутренних диссипативных процессов ds_i [Изаков, 1997, с. 1088]:

$$ds = ds_e + ds_i,$$

где $ds_i > 0$, а ds_e может иметь любой знак, т.е. может быть как приток, так и отток энтропии. В стационарном неравновесном состоянии приток негэнтропии равен производству энтропии в системе. Вопрос, однако, состоит в том, что производство энтропии в столь сложной системе, как реальная геосреда, рассчитать крайне сложно.

Напомним в этой связи, что в настоящее время для определения термина «энтропия» используется ряд характеристик, для которых он употребляется. В частности, энтропия может быть определена как логарифм фазового объема системы [Мартынов, 1996, с. 1126]. Абстрактным аналогом энтропии может выступать функция Ляпунова — функция состояния системы [Фрадков, 2005, с. 119]. Из соотношений для энтропии следует, что эта величина служит мерой экспоненциального разбегания траекторий динамической системы.

Важно, что энтропию динамической системы, в принципе, можно определить по измеряемым величинам. Однако даже для относительно простых физических систем, не говоря уже о геосреде, не всегда удается найти адекватную математическую модель анализируемой открытой диссипативной системы.

Пусть некоторая открытая динамическая система получает извне некоторую упорядоченную энергию (в случае геосреды — с тепловым потоком из низов литосферы) с мощностью P . Тогда, если температура системы равна C , а поступающая энергия имеет энтропию, ко-

торую можно характеризовать эффективной температурой C_{eff} то поток негэнтропии

$$-S_i = P \left(\frac{1}{C_{\text{eff}}} - \frac{1}{C} \right).$$

Это означает, что если имеется поток тепла, значит есть рождение энтропии [Изаков, 1997]. Но при этом с точки зрения экспериментальных приложений актуален следующий вопрос: получим ли мы при таком рассмотрении новую информацию о системе, ее состоянии и прогнозе развития? Очевидно, в первую очередь можно надеяться на определенный прогресс в понимании процессов самоорганизации в системах, в частности, неравновесных с множеством самоорганизующихся структур, роли негэнтропии, связи негэнтропии и информации. Так, если энтропия — это величина, характеризующая меру неупорядоченности системы, то она естественным образом оказывается связанной с понятием предсказуемости (горизонт прогноза) T поведения системы: на практике $T \sim K^{-1}$, где K — энтропия. И, далее, установлена прямая связь между негэнтропией и количеством информации (информация численно равна негэнтропии) [Изаков, 1997, с. 1090].

Как уже отмечалось, имеются весоные основания предполагать, что в процесс формирования очага будущего разрушения важный вклад вносят деформационные фронты, концентрирующиеся и стекающиеся в этот очаг. Но, как известно, главный физический процесс, происходящий на распространяющихся фронтах самоорганизованной критичности, состоит в рождении энтропии. В итоге в зоне возможного очага будет наблюдаться быстрый рост воспроизводства энтропии. В момент сейсмического события геосистема интенсивно выделяет энергию, происходит быстрый сброс энтропии очагом. Затем возможно повторение цикла.

Следовательно, рассмотрение геосреды как открытой диссипативной системы, управляемой не только притоком энергии, но и информации, дает дополнительные возможности понимания самоорганизации сложных иерархически организованных геосистем, их приспособление к изменяющимся условиям в окружающей среде. И, наконец, напомним, что все процессы на планете Земля происходят за счет притока негэнтропии, в частности, возникающего по причине того, что солнечная радиация, приносящая на планету энергию, имеет температуру порядка 6000 К, а уходя-

щая с ее поверхности инфракрасная радиация, уносящая в единицу времени примерно ту же энергию, имеет много меньшую температуру. В итоге она уносит много большую энтропию, компенсируя таким образом энтропию, произведенную во всех диссипативных процессах на планете [Изаков, 1997]. На этом фоне поток тепла из ее недр на земной поверхности, составляющий порядка 90 мВт/м^2 , оказывается пренебрежимо малым по сравнению с радиационным потоком от Солнца, что накладывает известные ограничения на возможности космического мониторинга на основе регистрации уходящего инфракрасного (ИК) излучения, хотя с космических аппаратов и обнаруживаются его ИК стационарные и нестационарные аномалии.

Заключение. Подытожим основные результаты и выводы проведенного рассмотрения. Развитие теории динамических систем во второй половине XX века привело к важным следствиям не только в физике и математике, но и в геофизике. Своеобразие нынешнего этапа исследований — формирование взглядов на геосреду как открытую иерархически неоднородную нелинейную систему и активное привлечение к ее изучению идей и принципов нелинейной динамики. При этом вариации геофизических полей интерпретируются в качестве проявления детерминированного хаоса в такой иерархически структурированной фрактальной среде. Открытость, нелинейность, когерентность (кооперационное взаимодействие элементов и подсистем геосреды на различных пространственных уровнях) — основные исходные предпосылки к ее изучению. При этом геосреда может рассматриваться как иерархия подсистем с различной нелинейностью, а развитие катастрофических событий реализуется лишь при согласованном поведении ее подсистем. Проявление колебательных движений — одна из форм диссипации поступающей энергии, а их спектр характеризует меру энергонасыщенности геосистемы.

Установлено, что как разрушение твердых тел (и хрупкое, и пластическое), так и сам сейсмический процесс являются результатом эволюции геосистемы. Эксперимент дает веские основания для предположения об автоволновом характере деформационных процессов в геосреде. При этом нелинейная динамика, очевидно, окончательно развеяла иллюзии относительно «глобальной предсказуемости» сейсмического процесса. Стало предельно ясно, что сейсмичность и сейсмический процесс тесно связаны с

решением ключевых проблем в физике и механике разрушения. И хотя к настоящему времени, в основном, построена теория бифуркаций многомерных динамических систем, достаточно продвинута теория перехода от детерминированного поведения к хаотическому (к примеру, теория русел и джокеров), выполнены исследования нелинейных волн (автоволн) и локализованных состояний во многих пространственно-распределенных системах, выбраться из всего этого многообразия представлений, подходов и трактовок с точки зрения приложений не так-то просто. С этой точки зрения отнюдь не кажется странным то обстоятельство, что хотя во многих работах этого цикла, даже вышедших в самые последние годы, и подчеркивалась или декларировалась ключевая роль нелинейно-динамического подхода при описании сейсмического процесса, его аппарат, как правило, использовался слабо, фрагментарно, формально и несистематически. Остро ощущается недооценка прямого экспериментального изучения с позиций нелинейной динамики реальной геосреды, а не лабораторных образцов. В частности, существующие методы мониторинга, как правило, не были ориентированы и не давали необходимой информации о строении геосреды и протекающих в ней процессах.

Очевидно, важным и актуальным является вопрос об экспериментальном исследовании эффектов синхронизации в системах со сложной динамикой, изучение влияния шумов на синхронизацию. Сюда могут быть отнесены, в частности, вопросы экспериментального исследования перемежающегося поведения вблизи границы синхронизации в присутствии шума, изучение влияния шумов на порог установления синхронизации колебаний, исследования синхронизации временных масштабов и влияние шума на этот тип хаотической синхронизации.

Установлено, что с приближением к сильному сейсмическому событию происходит аномальный рост флуктуаций, критическое замедление, рост корреляционных длин. Индивидуальное поведение структурных элементов (подсистем) геосреды становится менее значимым, в отличие от коллективных эффектов, охватывающих все пространственно-временные масштабы системы и преобладающих в области формирования очага (крупномасштабного разрыва). Очевидно и весьма вероятно, что при отсутствии теории указанные общие соображения могут служить минимальной основой для постановки мониторинговых наблюдений.

Заметим, что такие предвестники сильных событий, как нарастание низкочастотных мод в спектре шумов системы [Руманов, 2013] или поведение коэффициентов множественной синхронизации мультифрактального спектра сингулярности [Любушин, 2011], — частные проявления отмеченных закономерностей. Здесь уже отчетливо просматриваются существенные отличия от классических представлений первой половины XX века, когда не без оснований считалось, что геофизические поля являются индикаторами процессов, протекающих в геосреде, параметры горных пород, слагающих земную кору, функционально или корреляционно связаны с их составом и структурными особенностями, а пространственно-временное распределение и временные изменения геофизических полей несут непосредственную информацию о пространственно-временных изменениях геосреды. Очевидно, представления, не учитывающие возможности изменения свойств геосреды под влиянием происходящих в ней процессов, игнорирующие ее нелинейные свойства, автоволновую и резонансную природу процессов, большую, а иногда и определяющую, роль малых возмущений, структуру и способ организации ее элементов, интенсивное взаимодействие эмиссионных и внешних полей, носят весьма ограниченный характер и не могли дать положительных результатов в задаче прогноза сейсмического процесса.

Что же привнесли новые подходы к его описанию и прогнозу с прагматической точки зрения? Несмотря на пестроту и разнообразие подходов, очевидно, они могут быть объединены в некоторый единый смысловой кластер. Прежде всего, это тот уже общепризнанный факт, что геосреда как нелинейная динамическая система обладает свойством самоорганизованной критичности, а сам сейсмический процесс является результатом ее эволюции как многомасштабной иерархически организованной системы [Шаповал, 2011]. Установлено, что прогноз сейсмичности в реальном времени не противоречит самоорганизованной критичности сейсмического процесса. По крайней мере, представление о его самоорганизации согласуется с предсказуемостью сильных событий.

Теоретически и экспериментально обоснована концепция многоуровневого описания деформируемого твердого тела как нелинейной иерархически организованной системы, которая может быть описана в рамках нелинейной динамики и неравновесной механики [Панин и др., 2012]. Это дало необходимую физическую основу для построения эволюционной концепции процессов деформации и разрушения твердых тел и, в частности, описания механизмов формирования возможных очагов будущего разрушения [Макаров, 2011]. Заметим, что традиционный критериальный подход феноменологической макроскопической механики разрушения, основанной на макроскопическом масштабе усредненного описания геосреды, в принципе не способен решать проблему прогноза разрушения, так как геосреда — многомасштабная система [Макаров, 2011]. И, наконец, это серия работ И. Гуфельда, в которых предпринята попытка конкретизации движущих сил сейсмического процесса, природы слабой сейсмичности и повторяемости крупномасштабных разрывов в земной коре в рамках концепции взаимодействия восходящих потоков легких газов с твердой фазой литосферы.

Очерчены контуры, возможности, задачи и методы геофизического мониторинга [Любушин, 2011; Гуфельд и др., 2011; Гуфельд, 2013; Руманов, 2013], основой которого может быть только понимание физических процессов, протекающих в литосфере. Наличие зон затишья (затухание деформационного процесса ниже некоторого определенного уровня) и формирование диссипативных структур (цугов медленных деформационных фронтов) можно считать надежными предвестниками активной стадии формирования очага. Важно, что и сейсмоакустическая, и спонтанная электромагнитная эмиссии обладают характерными свойствами нелинейного процесса, способностью к периодической саморганизации и хаотизации, характерному поведению при приближении к событию. Очевидно, это не так мало для понимания существа дела и дает реальные основания для оптимизма при поисках предвестников сейсмических событий, по крайней мере, в плане прогноза краткосрочной сейсмической опасности.

Список литературы

Анищенко В. С., Нейман А. Б., Мосс Ф., Шимановский-Гайер Л. Стохастический резонанс как индуциро-

ванный шумом эффект увеличения степени порядка. *Успехи физ. наук.* 1999. Т. 169. № 1. С. 7—38.

- Бучаченко А. Л. Магнитопластичность и физика землетрясений. Можно ли предотвратить катастрофу? *Успехи физ. наук*. 2014. Т. 184. № 1. С. 101—108.
- Геншафт Ю. С. Земля — открытая система: геологические и геофизические следствия. *Физика Земли*. 2009. № 8. С. 4—12.
- Гийон Э., Митеску К. Д., Юлен Ж.-П., Ру С. Фракталы и перколяция в пористой среде. *Успехи физ. наук*. 1991. Т. 161. № 10. С. 121—128.
- Гуфельд И. Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Научное издание. Королев: ЦНИИМаш, 2007. 160 с.
- Гуфельд И. Л. Возможен ли прогноз сильных коровых землетрясений? *Вестник РАН*. 2013. Т. 83. № 3. С. 236—245.
- 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.
- Дмитриевский А. Н., Вологин И. А. Формирование и динамика энергоактивных зон в геологической среде. *Докл. РАН*. 2006. Т. 411. № 3. С. 395—399.
- Журков С. Н. Кинетическая концепция разрушения твердых тел. *Вестник АН СССР*. 1968. № 3. С. 46—52.
- Изаков М. Н. Самоорганизация и информация на планетах и в экосистемах. *Успехи физ. наук*. 1997. Т. 167. № 10. С. 1087—1094.
- Кагомцев Б. Б. Динамика и информация. *Успехи физ. наук*. 1994. Т. 164. № 5. С. 449—530.
- Климонтович Ю. А. Энтропия и информация открытых систем. *Успехи физ. наук*. 1999. Т. 169. № 4. С. 443—452.
- Лоскутов А. Ю. Очарование хаоса. *Успехи физ. наук*. 2010. Т. 180. № 2. С. 1305—1329.
- Любушин А. А. Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 года. Долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсмам. *Геофизические процессы и биосфера*. 2011. Т. 10. № 1. С. 9—35.
- Макаров П. В. Самоорганизованная критичность деформируемых твердых тел и сред и перспективы прогноза разрушения. *Международ. конф. «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика», посвященная 90-летию со дня рождения академика Н. Н. Яненко*. Новосибирск. Россия. 30 мая — 4 июня 2011 г.
- Малинецкий Г. Г. Хаос: тупики, парадоксы, надежды. *Компьютерра*. 1998. № 47. <http://old.computerra.ru/1998/275/2064>.
- Марков П. В. Математическая теория эволюции нагружаемых твердых тел и сред. *Физическая мезомеханика*. 2008. Т. 11. № 3. С. 19—35.
- Мартынов Г. А. Неравновесная статистическая механика, уравнения переноса и второе начало термодинамики. *Успехи физ. наук*. 1996. Т. 166. № 10. С. 1105—1133.
- Мячкин В. И., Костров Б. В., Соболев Г. А., Шалина О. Г. Основы физики очага и предвестники землетрясений. *Физика очага землетрясения*. Москва: Наука, 1975. С. 6—29.
- Николаевский В. Н. Очаг землетрясения — события и предвестники удара. В кн.: *Экстремальные природные явления и катастрофы*. Москва: Изд. РАН, 2011. Т. 2. С. 316—330.
- Панин В. Е., Егорушкин В. Е., Панин А. В. Нелинейные волновые процессы в деформируемом твердом теле как многоуровневой иерархически организованной системе. *Успехи физ. наук*. 2012. Т. 182. № 12. С. 1351—1357.
- Пантелеев И. А. Масштабно-инвариантные закономерности разрушения горных пород и развитие сейсмических событий: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Пермь, 2010. 24 с.
- Пантелеев И. А., Плехов О. А., Наймарк О. Б. Модель геосреды с дефектами: коллективные эффекты развития несплошностей при формировании потенциальных очагов землетрясений. *Геодинамика и тектонофизика*. 2013. Вып. 4. № 1. С. 37—51.
- Ребецкий Ю. А. Новые данные о природных напряжениях в области подготовки сильного землетрясения. Модель очага землетрясения. *Геофиз. журн*. 2007б. Т. 29. № 6. С. 96—115.
- Ребецкий Ю. А. Состояние и проблемы теорий прогноза землетрясений. Анализ основ с позиций детерминированного подхода. *Геофиз. журн*. 2007а. Т. 29. № 4. С. 102—120.
- 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.
- Страхов В. Н., Савин М. Г. Об управлении сейсмической активностью. *Геофиз. журн*. 2013в. Т. 35. № 6. С. 3—9.
- Страхов В. Н., Савин М. Г. О научных основах краткосрочного прогноза землетрясений. *Геофиз. журн*. 2013б. Т. 35. № 2. С. 18—23.

- Страхов В. Н., Савин М. Г. Уменьшение сейсмической опасности: упущенные возможности. *Геофиз. журн.* 2013а. Т. 35. № 1. С. 4—11.
- Трофименко С. В. Структура и динамика геофизических полей и сейсмических процессов в блоковой модели Земной коры: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Томск, 2011. 36 с.
- Фрагков А. Л. О применении кибернетических методов в физике. *Успехи физ. наук.* 2005. Т. 175. № 2. С. 113—138.
- Чеботарева И. А. Структура и динамика геосреды в шумовых сейсмических полях. Методы и экспериментальные результаты: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2011. 56 с.
- Шаповал А. Б. Вопросы прогнозируемости в изотропных моделях с самоорганизованной кри-
тичностью: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2011. 35 с.
- Шуман В. Н. Высокочастотный спонтанный электромагнитный шум литосферы и томографические системы. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 1. С. 43—63.
- Шуман В. Н. Геосреда как открытая нелинейная диссипативная динамическая система — задачи идентификации, возможности управления, прогноз эволюции (обзор). *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 5. С. 35—50.
- Шуман В. Н. О проблеме фоновой электромагнитно-акустической регуляции сейсмичности: геинженерный аспект. *Геофиз. журн.* 2013а. Т. 35. № 1. С. 46—60.
- Шуман В. Н. О феноменологических моделях и прогнозе сейсмичности: оправдан ли пессимизм, обоснованы ли надежды. *Геофиз. журн.* 2013б. Т. 35. № 2. С. 24—37.

Seismic process and up-to-date monitoring systems

© V. N. Shuman, 2014

Within the limits of specified views on geomedium as an open hierarchically heterogeneous nonlinear dynamic system the problems of predictability of seismic process and its realization based on the data of up-to-date monitoring systems have been considered and discussed. The processes of self-organization and mechanisms of destruction sources formation in the earth's crust are being analyzed as well as possibilities of their prediction, generation of spontaneous seismoelectromagnetic noise and obtaining information on geomedium properties, conditions of its deformation and the search of possible precursors of the active stage of destruction.

It is accentuated that monitoring studies must be conducted on the complex methodic base taking into account an active role of geomedium and its special dynamic states, scale-invariant regularities of seismic process development with initiation of dissipative structures of intensification including those ones created by cooperative behavior of its subsystems. The role and importance of active monitoring of geomedium state is accentuated including its excitability control and the search of synchronization effects, development of special means of observation and data analysis.

Key words: geomedium, seismic process, monitoring systems, precursors of destruction, dynamic systems.

References

- Anishhenko V. S., Nejman A. B., Moss F., Shimanovskij-Gajer L., 1999. Stochastic resonance: noise-enhanced order. *Uspehi fizicheskikh nauk* 169(1), 7—38 (in Russian).
- Buchachenko A. I., 2014. Magnetoplasticity and the physics of earthquake. Can a catastrophe be prevented? *Uspehi fizicheskikh nauk* 184(1), 101—108 (in Russian).
- Genshaft Ju. S., 2009. Earth — an open system: geological and geophysical investigation. *Fizika Zemli* (8), 4—12 (in Russian).
- Gijon Je., Mitesku K. D., Julen Zh.-P., Ru S., 1991. Fractals and percolation in porous media. *Uspehi fizicheskikh nauk* 161(10), 121—128 (in Russian).
- Gufeld I. L., 2007. The seismic process. Physical and chemical aspects. Publisher name. Korolev, 160 p. (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., Matveeva O. N., Novoselov O. N., 2011. Why we cannot predict strong earthquakes in the Earth's

- crust. *Geodinamika i tektonofizika* 2(4), 378—415 (in Russian).
- Dmitrievskij A. N., Volodin I. A., 2006. Formation and dynamics of energy-active zones in the subsurface. *Doklady RAN* 411(3), 395—399 (in Russian).
- Zhurkov S. N., 1968. Kinetic concept of fracture of solids. *Vestnik AN SSSR* (3), 46—52 (in Russian).
- Izakov M. N., 1997. Selforganisation and information for planets and ecosystems. *Uspehi fizicheskikh nauk* 167(10), 1087—1094 (in Russian).
- Kadomtsev B. B., 1994. Dynamics Information. *Uspehi fizicheskikh nauk* 164(5), 449—530 (in Russian).
- Klimontovich Yu. L., 1999. Entropy and information of open systems. *Uspehi fizicheskikh nauk* 169(4), 443—452 (in Russian).
- Loskutov A. Yu., 2010. Fascination of chaos. *Uspehi fizicheskikh nauk* 180(2), 1305—1329 (in Russian).
- Ljubushin A. A., 2011. Earthquake disaster in Japan on March 11 2011: Long-term prognosis of low-frequency microseisms. *Geofizicheskie processy i biosfera* 10(1), 9—35 (in Russian).
- Makarov P. V., 2011. Self-organized criticality of deformable solids and media destruction and prospects forecast: *Proceedings of the Intern. Conf. "Modern Problems of Applied Mathematics Mechanics. Theory, Experiment and Applications"*, dedicated to the 90th anniversary of academician N. N. Janenko, Novosibirsk, Russia, 30 May—4 June 2011 (in Russian).
- Malineckij G. G., 1998. Chaos: puffs, paradoxes of hope. *Komp'yuterra* (47). <http://old.computerra.ru/1998/275/2064> (in Russian).
- Markov P. V., 2008. The mathematical theory of the evolution of loaded solids and fluids. *Fizicheskaja mezhmechanika* 11(3), 19—35 (in Russian).
- Martynov G. A., 1996. Nonequilibrium statistical mechanics, transport equation, and the second law of thermodynamics. *Uspehi fizicheskikh nauk* 166(10), 1105—1133 (in Russian).
- Mjachkin V. I., Kostrov B. V., Sobolev G. A., Shalina O. G., 1975. Fundamentals of Physics hearth and earthquake precursors. Physics of the earthquake. Moscow: Nauka, 6—29 (in Russian).
- Nikolaevskij V. N., The earthquake — the harbingers of events and stroke. In: *Extreme natural phenomena and catastrophes*. Moscow: RAS Publ., 2011, 316—330 (in Russian).
- Panin V. E., Egorushkin V. E., Panin A. V., 2012. Nonlinear wave processes in a deformable solids multiscale hierarchically organized system. *Uspehi fizicheskikh nauk* 182(12), 1351—1357 (in Russian).
- Pantelev I. A., 2010. Scale-invariant patterns of destruction of rocks and development of seismic events. Abstract of the thesis. Cand. phys. and math. diss. Perm, 24 c. (in Russian).
- Pantelev I. A., Plekhov O. A., Naimark O. B., 2013. Model of geomeia containing defects: collective effects of defects evolution during formation of potential earthquake foci. *Geodinamika i tektonofizika* 4 (1), 37—51 (in Russian).
- Rebetskiy Yu. L., 2007b. New data on natural strains within the area of preparation for strong earthquake. The model of the earthquake source. *Geofizicheskij zhurnal* 29(6), 96—115 (in Russian).
- Rebetskiy Yu. L., 2007a. Condition and problems of theories of earthquakes prediction. Analysis of bases from position of appointed approach. *Geofizicheskij zhurnal* 29(4), 102—120 (in Russian).
- Rumanov E. N., 2013. Critical phenomena far from equilibrium. *Uspehi fizicheskikh nauk* 183(1), 103—112 (in Russian).
- Sadovsky M. A., 2004. Geophysics and Phesics of Explosion. Moscow: Nauka, 440 p. (in Russian).
- Strakhov V. N., Savin M. G., 2013b. On seismic activity control. *Geofizicheskij zhurnal* 35(6), 3—9 (in Russian).
- Strakhov V. N., Savin M. G., 2013b. On scientific of short-term earthquake prediction. *Geofizicheskij zhurnal* 35(2), 18—23 (in Russian).
- Strakhov V. N., Savin M. G., 2013 a. Seismic hazard reduction: lost opportunities. *Geofizicheskij zhurnal* 35(1), 4—11 (in Russian).
- Trofimenko S. V., 2011. Structure and dynamics of geophysical fields and seismic processes in crustal block model. Abstract of the thesis. Dr. geol. and min. sci. diss. Tomsk, 36 p. (in Russian).
- Fradkov A. L., 2005. Application of cybernetical methods in physics. *Uspehi fizicheskikh nauk* 175(2), 113—138 (in Russian).
- Chebotareva I. A., 2011. Structure and dynamics of seismic noise in geomeium fields. Experimental Methods and Results. Abstract of the thesis. Dr. phys. and math. diss. Moscow, 56 p. (in Russian).
- Shapoval A. B., 2011. Questions predictability in isotropic models with self-organized criticality. Abstract of the thesis. Dr. phys. and math. diss. Moscow, 35 p. (in Russian).

- Shuman V. N.*, 2014. High-frequency spontaneous electromagnetic noise of lithosphere and tomographic systems. *Geofizicheskij zhurnal* 36(1), 43—63 (in Russian).
- Shuman V. N.*, 2011. Geomedium as an open nonlinear dissipative dynamic system — the problem of identification, possibly of control, forecast evolution (Review). *Geofizicheskij zhurnal* 33(5), 35—50 (in Russian).
- Shuman V. N.*, 2013a. On the problem of background electromagnetic — acoustic regulation of seismic activity: geo-engineering aspect. *Geofizicheskij zhurnal* 35(1), 46—60 (in Russian).
- Shuman V. N.*, 2013b. On phenomenological models and seismic activity prediction: whether pessimism is legitimate or hopes are substantiated. *Geofizicheskij zhurnal* 35(2), 24—37 (in Russian).