

## Геосреда и сейсмический процесс: проблемы управления

© В. Н. Шуман, 2011

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 21 октября 2010 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

Виходячи з уявлень про геосередовище як енергонасичену відкриту нелінійну систему та запозичень апарату сучасної теорії управління складними нелінійними фізичними системами, розглянуто можливості та методи впливу на параметри сейсмічного процесу контрольованих (МГД-генератор, електророзвідувальний генератор, підземний ядерний вибух) і природних (магнітні бурі) джерел.

Як відомо, в гранично-енергонасичених середовищах відносно малий за потужністю вплив може привести до сильної зміни траєкторії системи у фазовому просторі. Розглянуто відомі приклади такого впливу. При цьому, з огляду на нинішній стан і можливості моніторингу сейсмічного процесу, відносно середовища ставлять істотніше ослаблену мету, зокрема, створення режимів з частково заданими властивостями або відтворенням режиму фонових рухів блоків. Роз'яснення фізичних механізмів такого впливу спирається на концепцію динамічно нестійкого геосередовища, запропоновану І. Л. Гуфельдом, в основу якої покладено уявлення про реакцію блочного геосередовища на взаємодію з глибинним потоком легких газів.

Зазначено, що шум у таких системах може бути конструктивним фактором, який зумовлює ріст ступеня когерентності або ступеня порядку в системі. В цьому контексті підкреслено можливість роль і значення стохастичного резонансу в управлінні такими системами.

Обговорено питання гармонізації задачі управління з результатами моніторингу, метою якого є або безпосередній прогноз характеристик процесу на деякий часовий проміжок вперед, або виділення інтервалів «аномальної поведінки», яке у деяких випадках може бути передвісником різких змін у системі в майбутньому.

On the basis of the concept on geomedium as an energy-saturated open nonlinear system with attraction of elements from the apparatus of modern theory of complicated nonlinear systems management, possibilities and methods of impact are considered of controlled (MHD-generator, electro-exploration generator device, underground nuclear explosion) and natural (magnetic storms) sources.

As is well known, in ultimately energy-saturated media relatively small impact as to its capacity can have its result as strong path modification in phase space. A set of well known examples and attempts of such an impact has been considered. In this case, taking contemporary experience and possibilities of seismic processes monitoring into account, much more weakened purposes are set, in particular, creation of regimes with partially defined properties or restoration of a regime of a background movement of blocks. Explanation of physical mechanisms of such an impact is supported by a concept of dynamically unstable geomedium proposed by I. L. Gufeld based on ideas of reaction of blocky geomedium on interaction with a flow of light gases.

It is noted that the noise in such systems can be a structural factor, which produces an increase of coherence degree or a degree of order in the system. It is underlined in this connection a possible role and importance of scholastic resonance in the management of distributed systems.

Problems of coordination of management problem with results of monitoring aimed at either direct forecast of characteristics of the process for some temporal interval forward or selection of the intervals of «anomalous behavior», which can become in some cases the precursors of dramatic changes in the system for future are discussed.

**Введение.** В последние годы появилась серия публикаций, посвященных проблеме управления сейсмическим процессом (изменения пространственно-временной структуры сейсмичности) на некоторой территории [Ав-

вагимов и др., 2002; Тарасов, 1995; 1999; 2007; Гуфельд, 2005; 2007 и др.]. Деликатность проблемы состоит в том, что если коровые сильные землетрясения пока не удается предсказать, то возможно ли и в какой степени управлять их

возникновением и эволюцией, принимая во внимание имеющийся опыт лабораторного и натурального эксперимента. В частности, многочисленные работы посвящены изучению влияния относительно слабых контролируемых (подземные ядерные взрывы — ПЯВ, магнитогидродинамические генераторы — МГД-Г, электроразведочные генераторные устройства — ЭГУ) и естественных (магнитные бури — МБ) источников. При этом в качестве критерия силы воздействия принимается соотношение энергии, закачиваемой в лабораторный образец или реальную среду с энергией тепловых флуктуаций  $kT$ , где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура (при обычных условиях  $kT \sim 4 \times 10^{21}$  Дж [Гуфельд, 2007]).

Согласно оценкам, выполненным И. Л. Гуфельдом, воздействие, вызываемое контролируемыми и естественными источниками, как правило, существенно меньше энергии тепловых флуктуаций. Тогда можно ли на основе имеющегося опыта сейсмического мониторинга говорить о каком-либо регулировании сейсмического процесса? Очевидно, по этой причине, имея ввиду воздействие на среду слабых естественных и контролируемых источников, в большинстве случаев говорится о «триггерном» характере их воздействия на сейсмический процесс, избегая при этом определения или конкретизации «триггерного воздействия». В такой картине, однако, фантазии превалируют над реальностью. Смысл триггерного воздействия в этом случае состоит в попытке изменения объемно-напряженного состояния среды и снятия таким образом накапливаемых в ней напряжений. Но это практически невозможно, если рассматривать процессы в литосфере с позиции классических представлений закрытых равновесных систем. Далее, если геосреда представляет собой чисто релаксационную систему, в которой нет собственных частот и, как следствие, невозможен и резонанс в классическом его понимании. Список вопросов и претензий такого рода, очевидно, можно продолжить [Гуфельд, 2007]. И все же, несмотря на проблематичность задачи воздействия на геосреду, многие авторы отмечают или указывают на принципиальную возможность внешнего контролируемого влияния на процессы формирования и распада крупномасштабных структур земной коры таким образом, чтобы сильное землетрясение сменилось крипом или «роем» более слабых событий [Гуфельд, 2007]. При этом принципиальное значение приобретает понимание физики регулируемости сей-

смического процесса как естественными, так и контролируемыми источниками, отсутствие которого, очевидно, и явилось причиной неудач или противоречивости результатов реальных экспериментов.

По-видимому, неудачи были обусловлены также и отсутствием адекватных представлений о геосреде как открытой диссипативной системе. Как известно, такие системы, будучи сильно неравновесными, обнаруживают сложное динамическое поведение. При рассмотрении их поведения и в особенности взаимодействия таких систем могут быть заимствованы или привлечены в несколько модифицированном виде принципы теории управления [Кадомцев, 1994; Фрадков, 2005]. Согласно [Кадомцев, 1994], «...игра нелинейных динамических процессов в таких системах очень часто приводит к самоорганизации, когда и динамическое, и информационное содержание процесса оказываются согласованными с большой точностью...». Примечательно, что малые сигналы, действующие на такие системы, могут приводить к существенным последствиям.

Как известно, при подпитке энергией извне диссипативная система может испытывать устойчивые колебания (устойчивый цикл) в фазовом пространстве или перейти в режим сложного стохастического движения (странного аттрактора). Одним из аттракторов может быть разрушение системы [Фрадков, 2005]. Существенно, что в неустойчивых открытых системах с диссипацией фазовое пространство упрощенно можно представить себе разделенным на области приближения к различным аттракторам и для перевода системы из одного аттрактора на другой ее нужно перебросить из одной области притяжения в другую. При этом важна не величина силового воздействия на систему, а его информационная характеристика. Иначе говоря, в таких системах малыми управляющими сигналами можно сильно изменить траекторию ее поведения [Кадомцев, 1994].

Очевидно, все эти вопросы, актуальные для современной геофизики, требуют конкретизации и дальнейшего исследования. По-видимому, проблема воздействия контролируемыми и естественными относительно слабыми источниками на сейсмический процесс с этих позиций не рассматривалась и не анализировалась. Основная цель данной работы — привлечь внимание специалистов к этой быстро развивающейся области исследований, иллюстрируя изложение некоторыми частными известными примерами.

**Геосреда как открытая диссипативная система.** Как известно, геосреда — очень специфический объект исследований. К фундаментальным свойствам относится ее строение: она состоит из множества различных по размерам блоков, перемещающихся как единое целое и взаимодействующих в процессе перемещения; она существует и эволюционирует в пространстве и времени в существенно больших интервалах значений, чем в любых лабораторных экспериментах. Неравновесность, нелинейность, неустойчивость реальной среды — вот те основные исходные позиции, на которых должна строиться геофизическая теория и которые не находят отражения в классических вариантах ее описания [Садовский, 2004; Гуфельд, 2007; Стаховский, 2007; Геншафт, 2009 и др.]. Она не может рассматриваться как континуум — ей присуща внутренняя самоподобная структура, для которой нет места для какой-либо области с характерными размерами и границами, как не существует и какого-либо характерного масштаба.

Очевидно, в рамках таких представлений природная среда, стремящаяся к самоорганизации, нуждается в новых моделях описания, которые бы позволили анализировать диссипацию поступающей в нее из земных недр энергии, релаксацию локальных напряжений, стационарные режимы деформирования, вопросы генерации сейсмoeлектромагнитных возмущений и их распространения. Напомним, что самоорганизация среды выражается в появлении в ней масштабно-инвариантной структуры, вызванной неравновесным состоянием земной коры под непрерывным воздействием тектонических напряжений [Садовский, 2004; Гуфельд, 2007; Геншафт, 2009].

Далее, геосреда — это открытая (с притоком энергии извне) нелинейная (в общем случае обладающая тремя типами нелинейности — физической, «геометрической» и структурной [Зайцев и др., 2006; Руденко, 2006]) диссипативная система. Ее отличительные признаки — необратимые изменения во времени, фрактальность, недетерминированность поведения после прохождения критической точки (бифуркации), волновая (автоволновая) и резонансная природа протекающих в ней процессов, большая (иногда и определяющая) роль малых возмущений [Гуфельд, 2007].

Как известно, эволюция нелинейных систем может осуществляться разными путями. На смену однозначности приходит множественность путей развития, многообразие поведения

ее объектов, а ограниченная точность в описании системы имеет принципиальное значение. При этом неустойчивость и пороговый характер самоорганизации (установления хаотического порядка) описываются нелинейными уравнениями.

Заметим, что имеются весомые основания предположить: ряд важных нерешенных геолого-геофизических проблем концентрируется в области быстрых изменений параметров геосреды [Кисин, 2008; Гуфельд, 2007]. При этом основным действующим фактором планетарного масштаба, определяющим и поддерживающим текущую нестабильность геосреды в состоянии, близком к критическому, могут быть процессы непрерывного взаимодействия восходящих потоков легких газов (водород, гелий и др.) с твердой фазой литосферы, при которых меняются объемы ее составных элементов, что и приводит к несинхронным вариациям объемно-напряженного состояния во внутриблоковых и граничных структурах [Дмитриевский, 2008; Гуфельд, 2007].

Представления о критических явлениях в открытых нелинейных системах позволяют с иных позиций подойти к проблеме прогноза сейсмической активности (землетрясений) [Лукк и др., 1996; Геншафт, 2009, Гуфельд, 2007 и др.]. В частности, в работе [Дещерский и др., 2003] обосновывается возможность извлечения прогнозной информации о динамике эндогенных процессов из хаотических высокочастотных вариаций геофизических параметров (парадигма нестационарных флуктуаций геофизических полей), а авторы [Соболев, Пономарева, 2003] вплотную подошли к трактовке тектонического процесса и развития очага землетрясения как о детерминированном хаосе, приводящем к самоорганизации.

Получила известность концепция самоорганизации статистических систем в критическом состоянии (Self-Organized Criticality (SOC)) [Bak, Tang 1989], а в качестве ее обобщения — математическая модель самоподобной сейсмогенерирующей структуры земной коры (ССС), основанная на идее согласования скайлингов трех мультифрактальных полей — разломного, сейсмического и сейсмoэнергетического [Стаховский, 2007].

Как обобщение работ этого направления можно рассматривать предложенную И. А. Гуфельдом концепцию динамически неустойчивой геосреды, на основе которой анализируется проблема управления сейсмическим процессом [Гуфельд, 2007]. Рассмотрению некоторых

аспектов этой проблемы и посвятим дальнейшее изложение.

**Об управлении в физических системах.** Приведем некоторые известные положения, относящиеся к моделям динамики физических систем. Как отмечается в работе [Фрадков, 2005], в последние годы произошел бурный рост числа публикаций, посвященных вопросам управления в физических системах или, в более широком плане, применению кибернетических подходов в физике. Согласно современной точке зрения, кибернетика понимается как теория управления в широком смысле и к кибернетическим методам относят не только методы управления, но и методы оценивания переменных и параметров систем, методы фильтрации, распознавания образов и др. [Фрадков, 2005; Кадомцев, 1994]. При этом во многих работах, хотя и отмечалась ключевая роль нелинейности системы, аппарат современной теории нелинейного управления использовался весьма недостаточно.

По мнению А. Л. Фрадкова это обусловлено тем, что возникающие задачи управления в физических системах, вообще говоря, существенно отличаются от традиционных задач автоматического управления. Так, вместо классической задачи управления — приведение траектории рассматриваемой системы в заданную точку (задача регулирования) и приближения траектории к заданному движению (задача слежения), ставятся ослабленные цели, а именно создание режимов с частично заданными свойствами, качественного изменения фазового портрета системы или синхронизации хаотических колебаний. С другой стороны, требуется «малость» управляющего воздействия.

Ситуация в этой области исследований, согласно [Фрадков, 2005], стала достаточно быстро меняться после выхода в свет статьи [Ott et al., 1990] «Управление хаосом», в которой был сделан вывод о том, что даже малое управление в виде обратной связи, приложенное к нелинейной (в частности, хаотически колеблющейся) системе может существенным образом изменить ее динамику и свойства и, к примеру, превратить хаотическое поведение в периодическое.

Согласно [Кадомцев, 1994], хаотическое поведение свойственно большей части динамических систем, как консервативных (с сохранением энергии), так и диссипативных. Близкие траектории хаотического движения разбегаются в фазовом пространстве: оно локально неустойчиво. Однако в системах с диссипацией в процессе движения фазовый объем сокращается и в простейшем случае такая система эво-

люционирует к состоянию равновесия. При подпитке энергией извне диссипативная система может испытывать устойчивые колебания или перейти в режим стохастического движения, которое получило название странного аттрактора. Как оказалось, все траектории диссипативной системы в фазовом пространстве соответствуют аттракторам: равновесию, периодическим колебаниям или странному аттрактору. Одним из аттракторов может быть разрушение рассматриваемой системы.

Если система неустойчива, то все траектории в фазовом пространстве разбегаются и здесь критически важное значение приобретают начальные данные: если поставить задачу, чтобы траектория реального движения была близка к выбранной или предпочтительной (т. е. попала в некоторую заданную область фазового пространства), начальные данные должны быть заданы с необходимой точностью. Принципиально важным является то обстоятельство, что малое смещение в фазовом пространстве может привести к нужной траектории, однако необходимо точно знать, куда смещаться [Кадомцев, 1994].

Как уже упоминалось, у открытых систем с диссипацией фазовое пространство в первом приближении можно представить разделенным на области притяжения к различным аттракторам и для перевода системы с одного аттрактора на другой надо перевести ее из одной области притяжения к другой.

Иначе говоря, внешнее воздействие должно перевести систему в любую точку притяжения другого аттрактора. При этом следует сообщить определенное количество информации:  $\ln(v/\Delta v)$ , где  $v$  — полный объем фазового пространства,  $\Delta v$  — объем притяжения второго аттрактора.

Очевидно, для реализации этого переброса требуется затратить определенное количество энергии. При этом, возможно, «...существует некое минимальное значение энергии, ниже которого такой перенос невозможен и соответствующий сигнал не реализует имеющуюся информацию» [Кадомцев, 1994]. Разумеется, здесь оказывается важным не только количество информации, но и ее содержание, т. е. указание, в какой конкретно аттрактор система переводится.

Существенно, что при переходе к поведению все более сложных систем именно структурные, информационные аспекты их поведения и развития выступают на первый план, в то время как динамика создает лишь основу для информационного развития. Поэтому во многих

работах по управлению хаотическими режимами не предполагается задания количественных характеристик желаемого движения, а задается лишь желаемый качественный тип аттрактора. В качестве дополнительного ограничения может выступать требование обеспечить достижение этой цели при маломощном, малозатратном воздействии. При этом говорят об управляемости системы, если при вариации входного параметра в области допустимых (или реализуемых) значений область изменения выходного параметра (характеристик поведения) охватывает значения, соответствующие желаемым режимам функционирования системы [Фрадков, 1994].

Итак, в неустойчивых системах малыми сигналами можно сильно изменить траекторию, причем для этих управляющих сигналов важна не их величина, а точное соответствие возможности перевода исходной траектории развития на нужную.

**Экспериментальные результаты по изменению естественного режима сейсмического процесса.** До настоящего времени предметом широких дискуссий все еще остаются два важных вопроса.

Во-первых, можно ли, опираясь на нынешний опыт и возможности мониторинга сейсмического процесса, говорить о воздействии на его параметры контролируемых источников. Во-вторых, насколько обеспечен информационный аспект этой проблемы, т. е. правильна ли по результатам современного мониторинга информация о структуре фазового пространства геосистемы конкретного региона?

Сложность проблемы состоит также в том, что при экспериментальных попытках изменения сейсмического режима можно рассчитывать на действие относительно слабых контролируемых (искусственных) — подземные ядерные взрывы (ПЯВ), МГД-генераторы (МГД-Г), электро-разведочные генераторные устройства (ЭГУ), инъекции малого по сравнению с эффективным объемом среды количества воды в трещины или естественных (магнитные бури (МБ) — источников, имея в виду то обстоятельство, что уменьшить заметным образом постоянно поддерживаемую за счет энергии недр предельную энергонасыщенность среды практически невозможно. Но, прежде чем переходить к рассмотрению этих вопросов, отметим некоторые установленные экспериментально особенности сейсмического процесса.

Эксперимент свидетельствует о наличии для наиболее крупных регионов по крайней мере двух компонент сейсмической активности ( $T$ - и

$M$ -компонент) [Фридман и др., 2010; Гаркавый и др., 1994]:

- глобальной (медленно меняющейся)  $T$ -компоненты (от англ. Total — глобальный), являющейся общей для двух полушарий и отражающей временные изменения сейсмической активности всего земного шара;

- зеркально-симметричной (быстро меняющейся)  $M$ -компоненты (от англ. Mirror — зеркальный) для северного и южного полушарий, которая в относительно спокойный период проявляет отчетливую зеркальную симметрию — когда в северном полушарии спад активности, в южном подъем, и наоборот.

Наиболее отчетливо  $T$ -компонента проявляется для самых сильных (магнитуда  $M \geq 5,5$ ) сейсмических событий.  $M$ -компонента лучше всего видна при анализе всего спектра событий ( $M \geq 4,0$ ), в котором доминируют слабые события. Однако в годы высокой сейсмической активности корреляция  $M$ -компонент может быть и положительной [Фридман и др., 2010].

Следовательно, можно предположить существование по крайней мере двух классов динамических факторов, определяющих изменение сейсмичности крупных тектонических структур, а именно глобального ( $T$ -компонента), контролирующего изменения во времени общего числа сильных землетрясений и механизма, обуславливающего  $M$ -компоненту, влияющего только на относительно слабые события в достаточном крупных регионах земного шара.

Наиболее примечательный экспериментальный факт — обнаружение «спокойного» периода сейсмической активности, связанного со временем проведения подземных ядерных испытаний в США и СССР: во время проведения полномасштабной программы подземных ядерных испытаний (1966—1988 гг.) землетрясения с магнитудой  $M \geq 8,3$  на земном шаре полностью отсутствовали (см. [Фридман и др., 2010, рис. 16]). Следовательно, в этом смысле можно говорить об изменении характера глобальной сейсмической активности Земли. Однако реакцию геосреды на действие контролируемых и естественных источников обычно связывают с активизацией режима слабой сейсмичности. При этом предполагается, что она ведет к разрядке упругих напряжений в больших объемах геосреды и, соответственно, к уменьшению энергии возможного сильного события [Тарасов и др., 1999; Гуфельд, 2007; Тарасов, 2007].

Примечательно, что, в отличие от ядерных подземных взрывов на Семипалатинском полигоне, относительно слабые взрывы химических

взрывчатых веществ мощностью около 400 кг (276 взрывов в Гармском районе Таджикистана, проведенных в 1979—1984 гг.) не вызывали заметных изменений сейсмичности.

Остановимся теперь на некоторых результатах воздействия на геореду пусков МГД-генератора, электроразведочного генератора и магнитных бурь, приведенных в работах [Закржевская, Соболев, 2002; Тарасов, 2007; Гуфельд, 2007]. Они достаточно неоднозначны. В частности, в работе [Тарасов, 2007] утверждается, что воздействие электромагнитных, импульсных возмущений, излучаемых МГД-генератором, приводит к существенной перестройке пространственно-временных свойств, сейсмического процесса сейсмоактивных зон, повышению устойчивости пространственного распределения сейсмичности во времени и одновременно ускоряет циклы ее перестройки. При этом обнаруживаются зоны, в которых при воздействии на среду МГД-генератора и магнитных бурь слабая сейсмичность возрастала, уменьшалась или не изменялась вообще. В частности, в работе [Соболев и др., 2001] отмечена знакопеременная динамика реакции геосреды в одних и тех же регионах, т. е. активизация сменялась затишьем, и наоборот. В то же время для других регионов отмечался только положительный эффект.

Установлена задержка реакции геосреды на воздействие импульса МГД-генератора от 2 до 7 суток, а при воздействии электроразведочным генераторным устройством — до 17 суток [Гуфельд, 2007; Тарасов, 2007].

Однако физический механизм инициирования сейсмичности электромагнитными импульсами в настоящее время остается неясным. Как уже упоминалось, в ряде работ указывается на триггерный характер их влияния на сейсмический процесс, хотя четкого определения триггерного эффекта не приводится.

Согласно [Гуфельд, 2007], смысл триггерного воздействия состоит в изменении объемно-напряженного состояния среды под влиянием слабых внешних воздействий.

И. А. Гуфельд утверждает, что эти источники «...не могут оказывать прямого действия на крупномасштабные структуры разрушения в литосфере ...». В то же время их действие возможно на локальные структуры, находящиеся в неравновесном состоянии в данный конкретный момент времени.

В рамках предложенной им физико-химической модели сеймотектонического процесса этого можно достичь путем воздей-

ствия контролируемыми или естественными источниками на пространственно-связанную блочную структуру, влияя на параметры восходящих потоков легких газов, ускоряя таким образом естественный процесс разблокировки границ, не допуская в результате появления крупномасштабных связанных структур. При этом методология воздействий должна учитывать нелинейные свойства среды, ритмичность воздействий и процессов дегазации, пространственный масштаб зоны эндогенного возбуждения литосферы. Главное в этом процессе — за счет искусственных воздействий уменьшить площадь пространственно-связанной блочной структуры и тем самым восстановить режим фонового движения блоков [Гуфельд, 2007].

В заключение следует упомянуть о воздействии на геосреду путем изменения уровня воды водохранилищ и возбуждением «вибраций», обусловленных энергией сбрасываемых вод. В частности, заполнение водохранилища Нурекской ГЭС вело к более упорядоченному высвобождению сейсмической энергии, к ее общему уменьшению, а число относительно слабых землетрясений увеличивалось почти вдвое [Гуфельд, 2007].

В работе [Соболев и др., 2006] показано, что сейсмичность в прилегающей к оз. Байкал зоне зависит от сезонных вариаций уровня озера, которые меняют поровое давление в диапазоне миллибар. При этом физический механизм изменения сейсмичности связывается, главным образом, с повышением внутрипорового давления и, соответственно, уменьшением эффективного давления пород в рамках модифицированного закона Кулона—Мора, а также эффектом смачивания водой стенок трещин. И далее делается (с учетом экспериментов на образцах) главный вывод: инъекция небольшого (0,01 %) по сравнению с объемом исследуемой модели количества воды в трещинах приводит к резкому усилению акустической эмиссии.

Разумеется, однако, эти лабораторные результаты вряд ли могут служить убедительным доказательством возможности регулирования сейсмического процесса, так как совершенно ясно, что рассматриваемые лабораторные образцы и условия их нагружения не могут моделировать реальную геосреду — динамически неустойчивую открытую нелинейную систему.

**Особенности и механизмы воздействия МГД-генератора, ЭГУ и МБ на сейсмический процесс.** Как уже отмечалось, трудности в интерпретации экспериментальных данных по воздействию указанных источников на активи-

зацию сейсмичности, очевидно, обусловлены отсутствием адекватных представлений о геосреде, механизмах механоэлектромагнитных преобразований, трудностями понимания причин быстрой изменчивости различных параметров геосреды. Трудности возрастают за счет эпизодичности и несистематичности эксперимента, отсутствия понимания динамического и информационного аспектов поведения сложных физических систем со стохастичностью, когда нелинейность ведет к бифуркации, т.е. выбору пути ее эволюции, а малое внешнее воздействие может приводить к сильному изменению траектории поведения геосистемы в фазовом пространстве.

Предпримем попытку анализа проблемы регулирования сейсмического процесса, исходя из позиции признания геосреды в качестве открытой нелинейной диссипативной системы. Будем считать установленным то, что геосреда эволюционирует по законам и критериям, присущим такого рода системам [Генштафт, 2009].

Каждая ее подсистема и элементы имеют свои энергетические параметры, меняющиеся во времени под воздействием нестационарного эндогенного энергетического потока. Энергетическая накачка геосреды способствует формированию активных систем и элементов, характеризующихся нелинейной динамикой совокупности физических полей и автоволновыми механизмами переноса. В частности, при определенной концентрации флюида возникает неустойчивость ее структурных элементов и происходит усиление процессов разрушения, что в конечном счете и приводит к активизации излучения из этих областей акустических и электромагнитных возмущений, отражающих нелинейную флюидодинамику процесса [Гуфельд, 2007; Дмитриевский, Володин, 2006; Дмитриевский, 2008]. В итоге, воздействуя на динамику восходящих газовых потоков, следствием взаимодействия которых с твердой фазой литосферы являются вариации объемов элементов геосреды и нарушение их аккомодации между собой и блоками, в принципе, возможно достижение регулируемости сейсмического процесса. При этом, согласно И. Л. Гуфельду, нет необходимости воздействия на всю пространственно-связанную блочную структуру. Главное при этом — это восстановление режима фоновых движений блоков.

Существенно, что в этом случае не предполагается задания каких-либо количественных характеристик их движения. Вместо этого пред-

усматривается лишь желаемый качественный тип предельного множества (аттрактора).

Особый интерес представляют оценки возможности преобразования энергии геосистемы при заданных уровнях управления и диссипации. Определяющее значение при этом имеет характеристика, описывающая степень возрастания энергии системы вследствие управления, определяющая меру возбудимости геосистемы, получившая название «индекса возбудимости» [Фрадков, 2005].

Индекс возбудимости может быть определен экспериментально подобно обычной частотной характеристике линейной системы: при измерении характеристики возбудимости изменяется амплитуда (уровень) входного сигнала [Фрадков, 2005].

Ясно, что в этом случае мы воспользовались ослабленной постановкой задачи управления, более естественной с точки зрения геосистем: найти управляющую функцию с минимальной нормой, обеспечивающую перевод системы из аттрактора разрушения в любую точку притяжения другого аттрактора (на другую траекторию развития).

**Уравнение генерации спонтанного электромагнитного излучения и задача управления.** Как известно, общепринятым описанием возникновения и эволюции пространственно-временных структур в возбудимых (активных) средах являются многокомпонентные системы уравнений типа «реакция—диффузия» [Давыдов и др., 1994; Шмидт, 2007]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha(u) \frac{\partial}{\partial x} u \right) + F(u), \quad (1)$$

где  $\alpha(u)$  — коэффициент диффузии.

С учетом данного обстоятельства и принимая во внимание множественность механизмов механоэлектромагнитных преобразований и, соответственно, генерации электромагнитных возмущений в очень широком диапазоне частот [Сурков, 2002; Гульельми, 2007; 2008; Шуман, 2008; 2010], в работе [Шуман, 2008] предложено обобщенное нелинейное уравнение генерации переменного магнитного поля  $\mathbf{B}$ :

$$\frac{\partial B_i}{\partial t} = \alpha_{ij} \nabla^2 B_j + F_i(\mathbf{B}), \quad (2)$$

где  $B_i(r, t)$  — индукция, функция пространственных переменных  $r \in D \subset R^n$  и времени  $t$ ;  $\nabla^2 = \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2}{\partial r_i^2}$

— оператор Лапласа, задающий диффузионный тип затухания процесса;  $\alpha_{ij}$  — матрица диффузии;  $F_i(\mathbf{B})$  — нелинейная функция, определяемая

динамичностью процессов взаимодействия геосреды с восходящими потоками легких газов и экзотермических реакций и, в конечном счете, разнообразием механизмов механоэлектромагнитных преобразований, протекающих в некотором объеме геосреды. При этом характеристики электромагнитных возмущений (импульсов или автоволн) определяются параметрами геосреды.

Как свидетельствует имеющийся опыт описания активных сред, основные закономерности образования автоволновых структур могут быть воспроизведены уже в рамках двух-трехкомпонентной системы [Давыдов и др., 1991], которую, с учетом (2), в простейшем случае можно записать в форме

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_i}{\partial t} &= \alpha_{ij} \nabla^2 B_j + F_i(\mathbf{B}, \mathbf{G}), \\ \frac{\partial G_i}{\partial t} &= \beta_{ij} \nabla^2 G_j + \varepsilon P_i(\mathbf{B}, \mathbf{G}), \end{aligned} \quad (3)$$

где функция  $\mathbf{G}$  определяет интенсивность динамических источников в геосреде.

Функция  $P_i(\mathbf{B}, \mathbf{G})$ , в принципе, может быть монотонной или даже линейной [Давыдов и др., 1991], в то время как функция  $F_i(\mathbf{B}, \mathbf{G})$  обычно задается полиномами или кусочно-линейными функциями. Случай, когда  $\varepsilon=0$ , соответствует однокомпонентной системе.

Уравнения (3) представляют собой достаточно сложную систему нелинейных уравнений в частных производных второго порядка. Обзор возможных подходов и методов ее решения, а также анализ особенностей этой системы приведен в работе [Цифра, Шуман, 2010]. В частности, с целью упрощения анализа уравнения (2) в этой работе предлагается использовать его симметрию. Симметричный метод позволяет свести это уравнение или систему (3) в частных производных параболического типа к изучению системы обыкновенных дифференциальных уравнений. С этой целью может быть использован как классический теоретико-групповой подход, так и его обобщение — метод условной инвариантности. Некоторые примеры, конкретизирующие вид функции  $\mathbf{F}(\mathbf{B})$ , приведены в работах [Гульельми, 2007; Шуман, 2010].

Как известно, уравнения (2), (3), в принципе, дают описание сложных режимов генерации и распространения электромагнитных возмущений в рамках рассматриваемой модели геосреды. Идея состоит в том, чтобы на его основе попытаться сформулировать задачу управления рассматриваемой системы (геосреды).

Согласно [Фрадков, 2005], для синтеза управления в пространственно-распределенных системах модели управления объекта могут быть получены либо путем дискретизации по пространству распределенных моделей, описываемых уравнениями в частных производных, либо как набор обычных дифференциальных уравнений, описывающих отдельные пространственные элементы (ячейки).

При дискретизации уравнения (2) по пространству множество  $D$  заменяется конечным числом точек-узлов  $r_k$ ,  $k=1, 2, \dots, N$ , каждому из которых соответствует переменная состояния  $\mathbf{B}_k(t)$ . При этом динамика величин  $\mathbf{B}_k(t)$  определяется как собственной динамикой  $\mathbf{F}(\mathbf{B}_k)$ , так и взаимосвязями с соседними узлами.

К специфическим целям управления, очевидно, следует отнести изменение исходной траектории в фазовом пространстве рассматриваемой системы на нужную. И здесь отчетливо просматриваются трудности решения этой задачи.

Во-первых, мы должны иметь необходимую информацию о структуре фазового портрета системы. Во-вторых, динамика  $\mathbf{F}(\mathbf{B}_k)$  определяется как распределением напряжений в геосреде, так и коэффициентами механоэлектромагнитных трансформаций, определяемых свойствами слагаемых ее горных пород и всей пространственно-связанной блочной структуры. При этом соответствующие параметры могут изменяться в широких пределах и, как правило, не поддаются непосредственному измерению. Попытки же использования некоторых эффективных их значений затруднительны, так как требуется их значение для каждого конкретного региона, где выполняются измерения и предпринимаются попытки управления.

Таким образом, главная проблема при попытке управления в геосистеме — это трудности, связанные с измерением состояния системы и реализацией управляющего воздействия на относительно коротких промежутках времени. Данное обстоятельство вызывает определенное беспокойство, поскольку вопрос управления сейсмичностью становится достаточно актуальным. По существу здесь мы имеем дело с наиболее сложным случаем «черного ящика», при котором информация о структуре модели фактически отсутствует.

**Эффект стохастического резонанса и управление распределенными системами.** Как уже отмечалось, в неустойчивых системах малыми сигналами можно сильно изменить траекторию

развития. Однако для выхода на нужную необходимо иметь довольно подробную информацию о ее структуре. Далее, чтобы реально осуществить переход системы с одного аттрактора на другой, требуется затратить некоторое количество энергии и, вполне возможно, существует некоторое ее минимальное значение, ниже которого этот переход невозможен и соответствующий сигнал не может реализовать переход на новую траекторию. Возникает вопрос: есть ли реальные возможности понижения этого порога, если к геосреде подходить как к чисто релаксационной системе, в которой нет собственных частот и, как следствие, невозможен резонанс в классическом его понимании?

Очевидно, можно дать на него положительный ответ: вероятность успеха можно повысить, если воспользоваться явлением, представляемым традиционно как «стохастический резонанс». Смысл этого названия состоит в том, что отклик системы на суммарное воздействие управляющего сигнала и шума в системе не монотонно зависит от интенсивности шума.

Как известно [Климонтович, 1999; Анищенко и др., 1999], эффект стохастического резонанса определяет группу явлений, при которых отклик нелинейной системы на слабый внешний сигнал заметно усиливается с ростом интенсивности шума в системе. Этот эффект представляет собой фундаментальное физическое явление, типичное для нелинейных систем. Иначе говоря, шум может выступать в роли конструктивного фактора, вызывающего рост степени когерентности или степени порядка в системе.

В частности установлено, что наличие источников шума (приливы, метеофакторы, неравномерность вращения Земли и др.) в нелинейных динамических системах может индуцировать принципиально новые режимы их функционирования, которые не могут быть реализованы при отсутствии шума. При этом шумовой сигнал может быть близким по своим статистическим свойствам белому, коричневому или фликкер-шуму (шуму мерцания).

Таким образом, идея состоит в том, чтобы с помощью шума в геосистеме контролировать эффективность и степень влияния источника (МГД-генератора) на геосреду с целью изменения траектории ее развития. Во всяком случае, можно думать, что это обстоятельство во многом определяет и объясняет неопределенность экспериментальных данных и отсутствие убедительных доказательств воздействия МГД-генератора, ЭГУ или магнитных бурь на сейсмический процесс из-за случайного не-

систематического характера постановки экспериментов, никак не связанных с характером шумовой компоненты в геосреде в момент его проведения. Разумеется, видны и трудности реализации этой идеи. После сделанных замечаний представляется уместным снова вернуться к проблеме регулирования сейсмического процесса.

Как уже отмечалось, сейсмический процесс реализуется в предельно энергонасыщенной геосреде, испытывающей непрерывное воздействие слабых внешних полей различной природы [Гуфельд, 2007; Садовский, 2004; Стаховский, 2007; Садовский, Писаренко, 1991; Геншафт, 2009]. Однако вопрос о физических механизмах влияния полей естественных и контролируемых источников на сейсмичность все еще недостаточно ясный. Весьма вероятно, что на современном уровне знаний о процессах в геосреде все еще невозможно дать исчерпывающее изложение этой стороны проблемы. Из работ данного направления следует, по крайней мере, три обстоятельства, нуждающиеся в объяснении.

Во-первых, это, конечно, вопрос о том, каким образом энергия электромагнитного импульса контролируемого (МГД-генератор, ЭГУ) или естественного (МБ) источника воздействует на изменение сейсмического режима. Во-вторых, чем вызвана временная задержка их влияния на сейсмичность в пределах 2—7 суток после начала воздействия [Закржевская, Соболев, 2002; Тарасов, 2007; Гуфельд, 2007]. В-третьих, чем обусловлено возрастание суммарной сейсмической энергии  $\Delta E$  после пусков МГД-генератора, превышающее на 5—6 порядков энергию, отдаваемую МГД-генератором в заземленный диполь [Закржевская, Соболев, 2002; Тарасов, 2007]. И вообще, случайны ли эти закономерности и откуда они взялись. Попытки объяснения трансформации электромагнитных возмущений в механические, основанные на классических представлениях о прямом воздействии электромагнитного импульса на мозаику электрических зарядов на бортах микротрещин, в свою очередь влияющую на механику процесса, или привлечением обратного сейсмoeлектрического эффекта второго рода, который напрямую устанавливает связь между величиной переменного электрического поля в среде и механическими колебаниями среды, не дали результатов из-за малости коэффициента электромеханической связи. Кроме того, помимо малости коэффициента электромеханической связи, исходя из этих

представлений, крайне проблематично объяснить наблюдаемую в эксперименте упомянутую выше задержку в 2—7 суток.

Что касается последнего третьего замечания, то в ряде работ высказана идея о триггерном характере воздействия МГД-генератора или магнитной бури на характер сейсмичности [Закржевская, Соболев, 2002; Уруцков, 2000] или об иницировании высвобождения энергии, уже накопленной в геосреде в результате иных процессов [Тарасов, 2007]. Но при этом мы снова возвращаемся к первому пункту, а именно: каков механизм этой инициации?

Как уже отмечалось, определенный прогресс в объяснении этого круга проблем достигнут в последнее время в рамках концепции динамически неустойчивой геосреды (физико-химической модели сейсмотектонического процесса), в основу которой положены представления о реакции блочно-иерархической геосреды на взаимодействие с потоками легких газов и экзотермических реакций водорода с другими газами [Гуфельд, 2007].

В соответствии с этой концепцией, именно восходящие потоки легких газов могут быть основным переменным фактором, контролирующим текущую неустойчивость литосферы и стимулирующим обмен энергией между отдельными элементами (блоками или их системами) среды.

Существенно, что именно на кинетику восходящих потоков легких газов могут оказывать влияние весьма слабые источники электромагнитных полей и механических вибраций. При этом уровень (порог) управления геосистемой может быть достаточно низким, вполне достижимым при постановке соответствующих экспериментов. С эффектами, обусловленными процессами дегазации, могут быть связаны также инкубационные периоды проявления акустической эмиссии и процессов перестройки объемно-напряженного состояния геосреды и сейсмического процесса [Гуфельд, 2007].

Разумеется, при этом воздействие контролируемых источников должно быть согласованным с проявлением естественных (приливы, метеофакторы, отдаленная сейсмичность, изменения угловой скорости Земли).

**Задача управления и мониторинг.** Очевидно, главная проблема при синтезе управления геосредой — это трудности с измерением ее состояния и реализацией управляющего воздействия (к примеру, пуска МГД-генератора) в нужные моменты времени или на нужных временных интервалах в условиях, когда про-

гноз времени ожидания сейсмических событий, как правило, отсутствует, а информация о структуре геосреды крайне ограничена и фрагментарна. Ясно, что классические принципы управления — приведения траектории системы в заданную точку или приближения траектории к заданному движению — применительно к геосистеме нуждаются в серьезной модификации. Возможно, это постановка ослабленных целей, а именно создание режимов с частично заданными свойствами.

Более адекватным в такой ситуации представляется ориентация на использование данных мониторинга. Как известно, целью мониторинга является либо непосредственный прогноз исследуемых характеристик процесса на некоторый временной интервал вперед, либо выделение интервалов времени «аномального поведения», которое в ряде случаев может служить предвестником резких или катастрофических изменений в будущем [Дещерский и др., 2003; Любушин, 2007].

Перспективными в этом плане выглядят следующие направления исследований:

- методы, основанные на идеях отслеживания параметров, характеризующих самоподобные свойства изучаемых сигналов и их изменение во времени;
- методы изучения временных изменений статистической структуры динамических процессов в геосреде;
- поиск сигналов синхронизации, согласованности вариаций наблюдаемых параметров, относящихся к состоянию изучаемого объекта земной коры измеряемых на пространственной сети системы мониторинга или измеряемых в совмещенном пункте различных физических величин. Весьма вероятно, что такой подход к оценке геодинамических свойств и характеристик локальных участков земной коры позволит строить диагностику ее состояния и, очевидно, более обоснованно, а скорее реалистично, подойти к проблеме управления сейсмическим процессом в сейсмогенерирующей геосреде или, возможно, оценить реальность этой проблемы.

**Заключение.** Идеи о самоподобной эволюции материала земной коры в условиях неравновесного состояния, представления о геосреде как открытой нелинейной диссипативной системе, в принципе позволяют привлечь аппарат современной нелинейной теории управления сложных физических систем [Кадомцев, 1994;

Фрадков, 2005]. При этом следует подчеркнуть ключевую роль нелинейности в рассматриваемой системе (геосреде). Однако вместо классических целей управления — приведение траектории системы в заданную точку (задача регулирования) или приближения траектории к заданному движению (задача слежения) — по отношению к геосреде ставятся значительно более ослабленные цели, а именно, создание режимов с частично заданными свойствами (за счет контролируемых искусственных воздействий уменьшить площадь пространственно-связанной блочной структуры и тем самым восстановить режим фонового движения блоков [Гуфельд, 2007]) или качественного изменения фазового портрета системы (перевод системы с одной траектории развития на другую или переброс системы с одного аттрактора (области притяжения) на другой).

Разумеется, речь при этом идет об открытых системах, через которые могут протекать большие энергетические потоки. В таких предельно энергонасыщенных системах, как известно, сигналами малой мощности можно сильно изменить траекторию поведения. Важно, что в рамках изложенных представлений отпадает необходимость контролируемого воздействия на всю пространственно-связанную блочную структуру геосреды. Главное здесь — за счет локальных воздействий восстановить режим фонового движения блоков [Гуфельд, 2007].

Именно понимание регулируемости сейсмического процесса и сам процесс понимания

дают ключ к постановке экспериментальных работ по управлению сейсмическим режимом.

К сожалению, однако, мы никогда не можем быть уверенными в том, что не пренебрегли чем-то весьма существенным. В этом контексте кажется актуальным совместный анализ данных, полученных в результате исследования различных природных процессов (систем мониторинга), ориентированных на прогноз изучаемых характеристик на некоторый отрезок времени вперед, либо выделение времени «аномального поведения» системы, которое может служить предвестником быстрых или даже катастрофических изменений в системе.

Наиболее существенный вывод, вытекающий из приведенных здесь соображений — это возможность воздействия на параметры сейсмического процесса. Отчетливо видны и трудности реализации этой идеи, связанные с оценкой реакции геосреды на действие контролируемых источников геофизических полей.

Напомним в этой связи, что образование пространственно-связанной структуры блоков в значительной степени зависит от интенсивности и скорости процессов дегазации и уровня внешних полей в данный период времени.

Возможно, многие читатели не согласятся со многими или с какой-то частью приведенных в работе рассуждений, но если у них возникнет желание разобраться или уделить внимание затронутым в статье вопросам и выработать по ним собственные представления, ее цель будет достигнута.

### Список литературы

- Авагимов А. А., Зейгарник В. А., Николаев А. В., Соболев Г. А., Пономарев А. В., Тарасов Н. Т., Новиков В. А., Тарасова Н. В., Челушке Т. Г. Влияние электромагнитных воздействий на сейсмический режим // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов. Второй международный симпозиум. Тез. докл. — Бишкек. — 2002. — С. 178—179.
- Анищенко В. С., Нейман А. Б., Мосс Ф., Шимановский-Гайер Л. Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения степени порядка // Успехи физ. наук. — 1999. — **169**, № 1. — С. 7—37.
- Гаркавый Н. Н., Левицкий А. С., Гайдакова Т. А., Трапезников Ю. А., Фригман А. М. О выявлении трех компонент в сейсмической активности Земли // Физика Земли. — 1994. — № 10. — С. 23—32.
- Геншафт Ю. С. Земля — открытая система: геологические и геофизические следствия // Физика Земли. — 2009. — № 8. — С. 4—12.
- Гуфельд А. В. Инерционные эффекты в коре и в магнитосфере Земли // Физика Земли. — 2008. — № 1. — С. 50—56.
- Гуфельд А. В. Ультранизкочастотные волны в коре и магнитосфере Земли // Успехи физ. наук. — 2007. — **177**, № 12. — С. 1257—1276.
- Гуфельд И. Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Науч. изд. — Королев: ЦНИИМаш, 2007. — 160 с.
- Гуфельд И. Л., Гусев Г. А., Собисевич А. Л. Правомерна ли постановка работ по предотвращению сильных коровых землетрясений? // Уральский геофизич. вестник. — 2005. — № 7. — С. 5—15.
- Давыдов В. А., Зыков В. С., Михайлов А. С. Кинематика автоволновых структур в возбудимых средах // Успехи физ. наук. — 1994. — **161**, № 8. — С. 45—86.
- Децкерский А. В., Лукк А. А., Сигорин А. Я. О новой парадигме прогноза землетрясений // Докл. РАН. — 2003. — **388**, № 2. — С. 233—236.

- Дмитриевский А. Н. Автоволновые процессы формирования флюидонасыщенных зон Земли // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы. Материалы Всерос. конф. (Москва, 22—25 апреля 2008 г.) — Москва: ГЕОС, 2008. — С. 6—8.
- Дмитриевский А. Н., Володин И. А. Формирование и динамика энергоактивных зон в геологической среде // Докл. РАН. — 2006. — **411**, № 3. — С. 395—399.
- Зайцев В. Ю., Назаров В. Е., Таланов В. И. «Неклассические» проявления микроструктурно-обусловленной нелинейности — новые возможности для акустической диагностики // Успехи физ. наук. — 2006. — **176**, № 1. — С. 97—102.
- Закржевская Н. А., Соболев Г. А. О возможном влиянии магнитных бурь на сейсмичность // Физика Земли. — 2002. — № 4. — С. 3—15.
- Кагомцев Б. Б. Динамика и информация // Успехи физ. наук. — 1994. — **164**, № 5. — С. 449—530.
- Кисин И. Г. Явление самоорганизации при взаимодействии флюидных потоков и геодинамических процессов в земной коре // Геофизика XXI столетия: 2007г. Сб. тр. девятых геофиз. чтений им. В. В. Федынского (Москва, 1—3 марта 2007 г.). — Тверь: ООО «Изд-во ГЕРС», 2008. — С. 82—88.
- Климонтович Ю. А. Что такое стохастическая фильтрация и стохастический резонанс? // Успехи физ. наук. — 1999. — **169**, № 1. — С. 39—47.
- Лукк А. А., Дещерский А. В., Сигорин А. Я., Сигорин И. А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса в фрактальной среде. — Москва: ОИФЗ РАН, 1996. — 210 с.
- Любушин А. А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга / Отв. ред. Г. А. Соболев. — Москва: Наука, 2007. — 228 с.
- Руденко О. В. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // Успехи физ. наук. — 2006. — **176**, № 1. — С. 77—95.
- Саговский М. А. Геофизика и физика взрыва. Избр. тр. / Отв. ред. В. В. Адушкин. — Москва: Наука, 2004. — 440 с.
- Саговский М. А., Писаренко В. Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. — Москва: Наука, 1991. — 95 с.
- Соболев Г. А., Закржевская Н. А., Харин Е. П. О связи сейсмичности с магнитными бурями // Физика Земли. — 2001. — № 11. — С. 62—72.
- Соболев Г. А., Пономарев А. В. Физика землетрясений и предвестники. — Москва: Наука, 2003. — 270 с.
- Соболев Г. А., Пономарев А. В., Кольцов А. В., Круглов А. А., Луцкий В. А., Цывинская Ю. В. Влияние инъекции воды на акустическую эмиссию при долговременном эксперименте // Геология и геофизика. — 2006. — **47**, № 5. — С. 608—621.
- Стаховский И. П. Самоподобная сейсмогенерирующая структура земной коры: обзор проблемы и математическая модель // Физика Земли. — 2007. — № 12. — С. 35—47.
- Сурков В. В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. — Москва: Изд. Моск. гос. инж.-физ. ин-та (техн. ун-та), 2002. — 238 с.
- Тарасов Н. Т. Изменение сейсмического процесса при облучении коры мощными электромагнитными импульсами. Электромагнитные исследования Земли (под ред. В. В. Спичака) // Материалы III междунар. конф. по электромагнитным зондированиям Земли (Звенигород, 2—8 сентября 2007 г.). — Москва: НФЗ РАН. — 2007. — С. 124—137.
- Тарасов Н. Т., Тарасова Н. В. Влияние ядерных взрывов на сейсмический режим // Доклады РАН. — 1995. — **343**, № 1. — С. 543—546.
- Тарасов Н. Т., Тарасова Н. В., Авагимов А. А., Зейгарник В. А. Влияние мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность // Вулканология и сейсмология. — 1999. — № 4/5. — С. 152—160.
- Уруцков И. И. О возможном механизме землетрясений // Прикл. физика. — 2000. — № 4. — С. 55—61.
- Фрагков А. Л. О применении кибернетических методов в физике // Успехи физ. наук. — 2005. — **175**, № 2. — С. 113—138.
- Фригман А. М., Поляченко Е. В., Насырканов Н. Р. О некоторых корреляциях в сейсмодинамике и двух компонентах сейсмической активности Земли // Успехи физ. наук. — 2010. — **180**, № 3. — С. 303—312.
- Цифра И. М., Шуман В. Н. Параболические системы типа «реакция-диффузия» при моделировании процессов генерации и распространения электромагнитной эмиссии литосферы и методы их анализа // Геофиз. журн. — 2010. — **32**, № 5. — С. 51—60.
- Шмидт А. В. Анализ систем реакция-диффузия методом нелинейных определяющих уравнений // Журн. вычисл. математики и матем. физики. — 2007. — **47**, № 2. — С. 256—268.
- Шуман В. Н. Уравнение генерации спонтанных электромагнитных сигналов в системе литосферных блоков // Геофиз. журн. — 2008. — **30**, № 1. — С. 42—48.
- Шуман В. Н. Электродинамика геосреды и методы геоэлектрики // Геофиз. журн. — 2010. — **32**, № 2. — С. 28—42.
- Bak P., Tang C. Earthquakes as self-organized criticality // J. Geophys. Res. — 1989. — **94**, № 15. — P. 635—637.
- Ott E., Grebogi C., Yorke J. A. Controlling chaos // Phys. Rev. Lett. — 1990. — **64**. — P. 1196—2001.