

О проблеме фоновой электромагнитно-акустической регуляции сейсмичности: геоинженерный аспект

© В. Н. Шуман, 2013

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 20 сентября 2012 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

Коротко обговорено фізичні передумови, можливості і методи впливу на сейсмічний процес. Згідно із запропонованою Ю. І. Гуфельдом фізико-хімічною моделлю сейсмічності, розв'язок задачі може полягати у впливі на динаміку процесу контрольованих і природних джерел. У рамках відомої концепції дисипативних структур у відкритих нерівноважних динамічних системах розглянуто ефекти фонові акустичної резонансної регуляції їх самоорганізації. Проаналізовано інші актуальні геоінженерні аспекти проблем регуляції і впливу, можливі способи їх розв'язання або переведення у практичну площину, зокрема, алгоритми та технології дії і управління.

Physical prerequisites and methods of seismic process impact are briefly discussed. According to physical-chemical model of seismicity proposed by I. L. Gufeld problem solving could be influence of sources both controlled and natural upon their dynamics. Within the limits of the well known concept of dissipative structures in the open unbalanced dynamic systems effects of background acoustic resonance regulation of their self-organization are considered. Some other actual geo-engineering aspects of regulation and impact problems, possible ways of their solution or transfer into practical aspect, in particular algorithms and technologies of influence and regulation are analyzed.

Введение. Сейсмичность (поток сейсмических событий различного ранга и интенсивности) является проявлением геологической эволюции Земли. Вопросы о возможности влияния или воздействия на параметры сейсмичности природными, контролируемыми или техногенными источниками, его физическая и геологическая природа, понимание процессов в геосреде и реализация понимания — одна из актуальных проблем современной геофизики. Очевидно, по своей значимости эта проблема стоит в одном ряду с прогнозом сейсмичности, а может быть, даже является и более важной, хотя решение обеих этих проблем тесно связаны между собой. Как известно, принципиальная возможность влияния на сейсмичность, процессы формирования и распада крупномасштабных структур разрушения в земной коре источниками различного происхождения можно считать установленной [Николаев, 1993, 1999, 2002; Тарасов и др., 1999, 2001; Авагимов и др.,

2005; Гуфельд, 2007; Мирзоев и др., 2009 и др.]. В частности, на сейсмичность оказывают влияние подземные ядерные промышленные и карьерные взрывы, вибрации, создаваемые сейсмическими вибраторами, сбросами воды с высотных плотин, массовыми бомбардировками территорий бывшей Югославии, Афганистана, Ирака, погодные и космологические факторы [Гуфельд, 2007; Мирзоев и др., 2009]. Обнаружено влияние мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность, периодических нагнетаний жидкости в глубокие скважины.

Суть и история вопроса, итоги исследований по природным и техногенным воздействиям на сейсмичность очерчены и представлены в недавних работах А. Л. Гуфельда [Гуфельд, 2007; Гуфельд, Матвеева, 2011] и К. М. Мирзоева, А. В. Николаева, А. А. Лукка, С. Л. Юнга [Мирзоев и др., 2009]. Однако, несмотря на значительные усилия, многие аспекты проблемы влияния на сейсмичность до сих пор остаются

ся непонятными. На геосреду и процессы в ней действуют многочисленные внутренние и внешние регулярные и стохастические источники, акустические и электромагнитные импульсы различной интенсивности и цветности, способные проявляться только на определенном (соответствующем их масштабу) иерархическом уровне структурной и динамической организации диссипативных структур (паттернов) геосреды. При этом кластерная сущность организации ее конденсированной фазы требует системного анализа структур и функционирования сложных эволюционирующих во времени объектов, которые в зависимости от иерархического уровня своей организации проявляют свойства детерминированных, стохастических, хаотических и сложных систем [Фрадков, 2005; Лоскутов, 2010; Геншафт, 2009; Анищенко, 1997; Лукк и др., 1996]. Эти системы, обладая свойствами физичности и моделируемости, характеризуются уникальностью и слабопредсказуемостью. В итоге, как правило, мы имеем дело с эмпирикой без должного теоретического обоснования. В частности, отсутствуют достаточно полные и адекватные модели глобального сейсмического процесса, отражающего временные изменения сейсмичности всего земного шара (seismology is still in pre-equation state [Keilis-Borok, 1994]). Проблемными остаются внутриплитовые землетрясения, природа слабой сейсмичности и микросейсмического шума [Мирзоев и др., 2009].

В рассматриваемом контексте предлагаемое в работе [Мирзоев и др., 2009] решение проблемы "... с помощью регулируемой закачки воды в скважины и вибровоздействий земной коры, согласованных с ритмом приливных движений" (с. 50) представляется малоэффективным и ориентированным на очень узкий спектр задач.

Во-первых, такая технология воздействия, ориентированная на приповерхностный слой земной коры, который практически не напряжен и наиболее сильно подвержен воздействию фоновых полей различной природы, может рассматриваться в качестве эффективного рассеивателя энергии, поступающей как с низов земной коры, так и внешних источников. Да и сама среда в пределах этого слоя в подавляющем большинстве случаев реактивна по отношению к физическим полям, в частности электромагнитным.

Во-вторых, не учитывается ряд существенных деталей процессов, отличающих поведение горных пород в земной коре в естествен-

ном залегании и лабораторном эксперименте. В частности, из рассмотрения выпали не моделируемые при нагружениях лабораторных образцов быстрые и разномасштабные вариации объемно-напряженного состояния (ОНС) геосреды, которые рядом исследователей рассматриваются в качестве ее реакции на взаимодействие с восходящими потоками легких газов [Гуфельд, 2007; Гуфельд, Матвеева, 2011; Gufeld et al., 2011].

В-третьих, хотя и отмечается, что в основу рассуждений положена физическая модель геосреды, предложенная М.А. Садовским, в работе [Мирзоев и др., 2009] не рассматриваются и не упоминаются общие законы воздействия и управления нелинейными активными распределенными системами, установленные физиками.

В рассматриваемом контексте кажется естественным скепсис и неверие в возможность эффективного контролируемого воздействия на сейсмический процесс, который присутствует среди многих профессионалов-геофизиков. Вероятно, он также обусловлен и базируется на убежденности в том, что энергия воздействия должна быть значительной, сопоставимой с энергией объекта воздействия. Но, как оказалось, это не так, и некоторый оптимизм здесь связан с высокой чувствительностью пространственно-связанной блочной структуры земной коры к внешним воздействиям. В рамках этих представлений задача может быть сформулирована иначе: воздействовать контролируемые источниками на динамику восходящего потока легких газов, восстанавливая тем самым режим фонового движения блоков [Гуфельд, 2007].

Как свидетельствует эксперимент [Гуфельд, 2007; Гуфельд и др., 2011; Авагимов и др., 2005], энергетика эффективного воздействия может быть несоизмеримо мала по сравнению с мощностью естественных процессов в геосреде. При этом, разумеется, речь идет об открытой физической системе — геосреде, через которую протекают большие энергетические потоки. В этом аспекте фоновые достаточно слабые воздействия могут оказаться конструктивнее мощных (к примеру, подземных ядерных взрывов, которые ведут к разрушению системы) [Фрадков, 2005; Колесников, 2009].

Можно предположить, что существует некоторое минимальное значение интенсивности управляющего воздействия, ниже которого такое управление становится невозможным и оно не решает поставленную задачу. Очевид-

но также, что должен быть найден амплитудно-частотный оптимум сигнала и способ его введения в геосреду, морфология и параметры состояния которой часто оказываются неизвестными и изменяющимися во времени.

Как известно, быстрые процессы в геосреде могут происходить в результате фазовых переходов как явление декомпрессии при термодинамической неустойчивости локальных объемов земной коры с восходящими потоками легких газов и экзотермических реакций водорода с другими газами [Гуфельд, 2007]. Подобные явления характерны для самоорганизующихся открытых нелинейных диссипативных систем. Такие системы обычно демонстрируют поведение типа динамического хаоса и обладают свойством локальной неустойчивости. Это свойство предопределяет наличие горизонта предсказуемости поведения системы, который обычно с большим трудом поддается расширению [Кравцов, 1989; Лукк и др., 1996; Шаповал, 2011]. Тем не менее, в рамках концепции динамически неустойчивой геосреды, вообще говоря, идея регулирования (влияния) сейсмичности, несмотря на сложность и проблемность реализации, кажется вполне правомерной и даже простой. Но тогда почему на нее ушло так много времени? Возможно, основная причина кроется в недоверии — многие профессионалы не верили, что она может работать. Но даже в таком случае она может оказаться интересной. Разумеется, простых решений задачи воздействия на геосреду с целью контроля сейсмичности, не учитывающих прогноз активности сейсмических событий, релаксирующее действие естественных фоновых физических полей и особенностей пространственно-временного режима слабой сейсмичности, ожидать не приходится. Ее решению мешает и неопределенность геофизической модели геосреды, и наличие шумов различной природы, и острая недостаточность экспериментальных данных, и ограниченность финансовых ресурсов [Шуман, 2011а, б].

Цель настоящей статьи довольно ограниченная — проанализировать ряд аспектов проблемы регуляции и влияния, неопределенности и ограничения модельных представлений, а также рассмотреть некоторые технологические возможности ее реализации.

Геофизическая среда. Важнейший итог экспериментальных исследований, начатых в 70—80-х годах прошлого века под руководством академика М. А. Садовского, учение о геосреде, суть которого состоит в ее иерархичес-

кой неоднородности, физической нелинейности, активности, изменчивости (пространственной и временной) физических свойств, способность происходящих в ней процессов взаимодействовать между собой [Садовский, 2004].

Геосреда — хороший пример открытой неравновесной системы с множеством самоорганизующихся структур [Лукк и др., 1996; Гуфельд, 2007; Шуман, 2011б]. Она предельно энергонасыщена, в ней существуют комплексы нелинейных взаимодействий между физическими полями, структурами и подсистемами [Гуфельд, 2007; Генштафт, 2009]. В частности, на ее предельную энергонасыщенность указывают современные движения, постоянное деформирование, характерные как для сейсмоактивных, так и для асейсмических регионов. Энергетическая подпитка вызывает увеличение неравновесности и неустойчивости системы. Она способна формировать различные пространственно-временные структуры, представляющие собой импульсы и фронты возбуждения, неустойчивость которых приводит к установлению в ней самоподдерживающихся колебаний с определенной конфигурацией. В неоднородной среде колебательная неустойчивость ведет к образованию стоячих волн. При этом достаточно располагать источником энергии, чтобы самовозбуждение колебаний стало возможным. Самый мощный источник энергии в литосфере — тепловой поток из ее низов.

Как показано в ряде работ (см., например, [Зосимов, Лямшев, 1995] и цитируемую там литературу), диссипативные твердотельные структуры, самоорганизующиеся в открытых системах, являются фрактальными. Оказалось, фрактальные свойства и формы присущи большому количеству процессов и структур. Интерес и успех в применении фрактальных моделей вызван и обусловлен, прежде всего, тем обстоятельством, что сформированные в условиях диссипации энергии в открытой системе — геосреде и являющихся самоорганизованными структурами, приобретают ряд необычных свойств, которые невозможно получить при традиционных способах формирования структурного состояния вещества. Можно думать, что фрактальные структуры и геометрический шум литосферы (в частности, шум мерцания) являются соответственно пространственными и временными "отпечатками" или "срезами" самоорганизованной критичности.

Понятно, что необходимость описания рассматриваемых систем и попыток прогноза их

эволюции привели к появлению серии выдающихся работ, в которых были заложены основы теории самоорганизации. При этом использовались различные подходы и названия: теория самоорганизации или теория диссипативных структур, синергетика, теория открытых систем, информационная динамика [Изаков, 1997].

Существенно, что постоянно действующие внешние факторы — лунно-солнечные приливы, изменения скорости вращения Земли, сильные сейсмические события и другие факторы оказывают сильное влияние на геологическую эволюцию Земли. При этом иерархическая неоднородность среды определяет появление сильных концентраций волновых полей на малых дефектах ее структуры и объясняет сильную нелинейность физических свойств горных пород, проявляющуюся при распространении весьма слабых возмущений — сейсмических, электромагнитных, деформационных [Николаев, 2002].

Определяющее значение имеет тот факт, что встав на позиции признания геосреды в качестве открытой нелинейной диссипативной динамической системы, можно понять ряд явлений, не находящих отражения в рамках классических подходов. С этих позиций и продолжим дальнейшее рассмотрение упомянутых во введении задач.

Сейсмичность в литосфере. Как известно, сейсмические явления включают крупномасштабные разрывы в земной коре (сильная и средняя сейсмичность), непрерывный планетарный микросейсмический шум и криповые подвижки блоков [Гуфельд, 2007; Садовский, 2004]. С. В. Гольдин выделяет четыре типа или класса механических движений, в которые вовлекаются горные породы земной коры: движения блоков как жестких тел, волновые движения, в частности сейсмические волны, течение вещества (крип), переупаковка [Гольдин, 2004].

Землетрясения классифицируются по глубине гипоцентров как неглубокие (литосферные), $h < 70$ км, промежуточные (астеносферные), $h \approx 70 \div 300$ км, и глубинные, $h > 300$ км. На глубинах более 720 км землетрясения не отмечены. Подавляющее их число происходит на границах литосферных плит. Многочисленными исследованиями установлены глобальные и локальные закономерности сейсмического режима. В частности, отмечается наличие двух компонент сейсмической активности — T - и M -компоненты [Фридман и др., 2010]. Каган образ-

но определил сейсмичность как "турбулентность в земной коре" [Каган, 1994]. Как и в турбулентности, существует источник энергии, постоянно создающий на границах плит напряжения посредством конвекции в мантии, приводящий в движения плиты относительно друг друга. Проблемными остаются внутриплитовые землетрясения, природа слабой сейсмичности и микросейсмического шума [Гуфельд, 2007; Гуфельд и др., 2011]. Очевидно, их механизмы различны.

Как уже отмечалось, "мотором" всей геодинамики является геотермический поток со средней мощностью $w \approx 90$ мВт/м², что при интегрировании по всей площади земной поверхности дает полную мощность $4,5 \cdot 10^{13}$ Вт [Голицын, 2008]. Эта мощность расходуется как на образование и поддержание плит, так и на сейсмический процесс, на который, согласно имеющимся оценкам, уходит лишь порядка 0,1% поступающей геотермической мощности. При этом плиты не могут быть меньшими по размеру, чем толщина литосферы. Сама же земная кора весьма неоднородна по латерали.

И. А. Гуфельдом [Гуфельд, 2007] предложена физико-химическая модель сейсмичности, в основу которой положены представления о реакции блочной геосреды на взаимодействие с восходящими потоками легких газов (водород, гелий) и экзотермических реакций водорода с другими газами, и рассмотрены сценарии развития сеймотектонических ситуаций для платформенных областей. Предполагается, что основным переменным фактором, определяющим и поддерживающим текущую нестабильность геосреды и поддержание ее на уровне, близком к критическому (предельному), выступает восходящий поток легких газов из мантии. Следствием их взаимодействия с твердой фазой литосферы являются вариации объемно-напряженного состояния геосреды.

Примечательно, что лабораторный эксперимент по моделированию процессов взаимодействия легких газов с образцами горных пород подтверждает это предположение. Следовательно, динамические явления и вариации различных параметров геосреды в принципиальном плане могут рассматриваться на основе этих процессов. Заметим, что в силу своей фундаментальности и простоты парадигма самоорганизованной критичности также оказалась востребованной к описанию процессов формирования сейсмических событий [Шаповал, 2011].

Геосреда и вызванная сейсмичность. В связи с изложенными представлениями возникает ряд вопросов. Очевидно, первый из них — можно ли воздействовать на ход сейсмического процесса, влиять на его параметры источниками естественного или контролируемого (искусственного) происхождения в принципе, вообще и в частности таким образом, чтобы сильное сейсмическое событие заменить серией более слабых, крипом или нарушить связанное состояние блоков, сформировавшихся в процессе эволюции земной коры? Как свидетельствует эксперимент, имеются весомые свидетельства реакции геосреды на действие относительно слабых искусственных и естественных физических полей [Тарасов и др., 1999; 2001; Закржевская, Соболев, 2002; Авагимов и др., 2005; Гуфельд, 2007 и др.]. При этом речь не идет об уменьшении предельной энергонасыщенности геосреды, что, очевидно, невозможно [Gufeld et al., 2011].

В этой связи следует отметить обнаружение "спокойного" периода сейсмической активности, совпадающего с проведением подземных ядерных испытаний США и СССР, наиболее активная фаза которых — с 1966 по 1988 г. В этот период, очевидно, можно говорить об изменении характера сейсмичности на всем земном шаре: наиболее сильные землетрясения с магнитудой $M \geq 8,3$ отсутствовали полностью [Фридман и др., 2010]. Однако такое энергозатратное, весьма специфическое и экологически небезопасное воздействие по известным причинам вряд ли можно считать эффективным или приемлемым "управлением", которое обычно ассоциируется с малыми внешними возмущениями или малыми изменениями в структурных элементах системы [Кадоццев, 1994]. С этой точки зрения важны экспериментальные доказательства реакции геосреды на действие весьма слабых полей источников естественного и искусственного происхождения, приведенные в серии статей [Тарасов и др., 1999; Закржевская, Соболев, 2002; Гуфельд, 2007; Авагимов и др., 2005 и др.]. Здесь на первый план выходит проблема быстрой изменчивости параметров среды, которая находит объяснение в рамках концепции динамически неустойчивой геосреды. Согласно И. Л. Гуфельду, основным переменным фактором, определяющим и поддерживающим текущую нестабильность геосреды вблизи предельного уровня, может быть восходящий поток легких газов [Гуфельд, 2007]. В рамках предложенной им физико-химической модели сейсмичности

принципиально возможно оказать влияние на процессы формирования и распада крупномасштабных структур, пространственно связанную блочную структуру, путем изменения параметров восходящих потоков легких газов, в частности активизацией их потоков в канале твердое тело — флюид. Этого, в частности, можно достичь путем воздействий источниками естественной природы и контролируруемыми источниками воздействия на пространственно связанную блочную структуру.

Как известно, вариации объемно-напряженного состояния (ОНС) среды зависят от парциального давления легких газов во флюиде и твердой фазе. В свою очередь, изменения парциального давления легких газов обусловлены как вариациями их потоков из мантии, так и вариациями концентрации других растворенных во флюиде газов. При этом на их кинетику могут оказывать влияние весьма слабые источники вибрации и электромагнитных полей [Гуфельд, 2007], а отклик такой нелинейной системы на внешнее воздействие может оказаться различным в зависимости от условий самовозбуждения в рассматриваемый момент времени.

Очевидно, можно сказать, что этим мы ответили на вопрос, чем нужно управлять в системе. Теперь на очереди появляется второй — как управлять процессом. Очевидно, простых решений этой задачи ожидать не следует. Как известно, в открытых конденсированных эволюционирующих системах (средах), для которых часто неизвестными оказываются морфология и параметры состояния, "управление" всецело определяется выбором и подготовкой источника воздействия и контролем доступной группы параметров геосреды. Трудности возрастают в связи с необходимостью влияния на ненагруженный приповерхностный слой литосферы. Он испытывает воздействие в большей степени фоновых полей: лунно-солнечных приливов, сейсмических волн отдаленных землетрясений, метеофакторов и др. Очевидно, необходимо учитывать действие как внешних, так и внутренних сил.

Об иерархических системах с информационным поведением. Принципиальная сторона рассматриваемой проблемы — у самоорганизующихся систем со сложно организованной внутренней структурой появляется возможность расслоения на две тесно связанные друг с другом подсистемы или части — динамическую и информационную [Кадоццев, 1994]. При этом те структурные элементы системы,

которые могут сильно влиять на динамику сравнительно малыми возмущениями (импульсами), принято относить к ее структуре управления. Такая возможность появляется в силу большой сложности "фазового портрета" системы [Кадомцев, 1994].

Как известно, у открытых систем с диссипацией фазовое пространство в процессе развития сохраняется и его можно представить разделенным на области притяжения к различным аттракторам — равновесию, периодическим колебаниям или странному аттрактору, одним из которых может быть срыв или разрушение системы. Существенно, что при выведении системы из заданного аттрактора путем внешнего воздействия она будет эволюционировать к другому, зона притяжения которого включает точку ее начального состояния. Иначе говоря, для перевода системы с одного аттрактора на другой ее нужно перевести с одной области притяжения в другую. При этом оказывается важной не величина основного воздействия, а его информационное содержание, хотя, возможно, существует минимальная мощность, минимальное значение этого воздействия, ниже которого такой процесс перевода невозможен или нереализуем по каким-либо причинам. В этом случае переход от одного аттрактора к другому (в другое стационарное состояние) соответствует преодолению некоего порога. Тем не менее, не только динамический, но и информационный аспект оказывается важным для этого перехода.

Идеи самоорганизации и образования диссипативных структур в открытых системах представляются исключительно актуальными и важными с точки зрения того, чтобы перебросить "мост" между физикой, в которой информационная связь появляется при взаимодействии сложных нелинейных систем со стохастическим поведением, когда малое внешнее воздействие может приводить к сложному изменению ее траектории в фазовом пространстве, и геофизикой. В геофизике оптимизм, очевидно, может быть связан с высокой чувствительностью пространственно-связанных блочных структур геосреды к внешним воздействиям. Одна из задач — это поддержание режима блоков и предотвращение их блокировки. Проблема, однако, состоит в неопределенности как места или конкретной границы разблокировки в пространственно-связанной блочной структуре, так и времени реализации.

Хаос и случайность в геодинамической системе. Как известно, хаотические процессы в геосреде — открытой динамической диссипативной системе, развитие которой определяется глобальными процессами энергетики, дегазации и динамики Земли — одно из фундаментальных направлений исследований современной геофизики [Гуфельд, 2007; Генштафт, 2009; Дмитриевский, Володин, 2008]. Проявление колебательных движений в геосреде — одна из форм диссипации энергии, поступающей из низов литосферы. При этом спектр колебаний характеризует меру энергонасыщенности системы, а сама геосреда постоянно находится в неустойчивом (неравновесном) состоянии [Лукк и др., 1996]. Как уже отмечалось, в ней существуют комплексы нелинейных взаимодействий между физическими полями, структурами и подсистемами, а кластерная сущность организации является ключом к пониманию функционирования эволюционирующих во времени ее объектов, которые в зависимости от иерархического уровня своей организации проявляют свойства детерминированных, стохастических, хаотических и сложных систем.

Установлено, что хаос может рождаться универсальными способами независимо от природы динамической системы. При этом случайность может быть обусловлена как внутренними ее свойствами, так и внешними факторами, а исследуя временные ряды мониторинговых наблюдений, можно отличить случайное, стохастическое (недетерминированное) поведение системы от детерминированного хаоса [Лоскутов, 2010, с. 1327].

Согласно А. Ю. Лоскутову, хаос следует определять как некоторый случайный процесс, наблюдаемый в динамической системе, не подверженной влиянию внешних импульсов или каких-либо случайных сил. При этом критерием отличия между регулярной, но сложной динамикой и хаосом может служить устойчивость системы к малым возмущениям: если она отсутствует, то детерминированное описание поведения системы на больших временах теряет смысл и возникает необходимость перехода к использованию статистических методов.

Необходимое условие возникновения хаоса в динамической системе — размерность ее фазового пространства $N \geq 3$, т. е. состояние системы характеризуется минимум тремя переменными [Анищенко, 1997; Лоскутов, 2010].

Заметим, что под моделью детерминированного хаоса обычно подразумевается модель,

представляющая хаотические системы и их динамику и обладающая следующими свойствами: нелинейность, возможность хаотического движения детерминированной системы, "чувствительность" динамических переменных к малым возмущениям в начальных условиях, ограниченность предсказуемости динамики системы (наличие "горизонта предсказуемости"). Режим детерминированного хаоса в нелинейных динамических системах с диссипацией обоснован теоретически и подтвержден многочисленными экспериментами [Лукк и др., 1996; Лоскутов, 2010]. Существенно, что все самоорганизованные критические системы являются слабохаотическими. Важное значение имеет тот факт, что слабый хаос весьма существенно отличается от полностью хаотического поведения, характеризующее временным интервалом, выход за который при прогнозировании их состояния невозможен. Для слабохаотических систем, к числу которых может быть отнесена и геосреда, такая характеристика, вообще говоря, отсутствует, что, в принципе, позволяет делать более долговременный прогноз.

Особенность слабого хаоса состоит в том, что хаотические движения обычно не выходят за определенные рамки, т. е. хотя близко расположенные траектории системы и расходятся экспоненциально, они никогда не удаляются слишком далеко друг от друга [Анищенко, 1997; Дайсон, 2010; Лоскутов, 2010]. Тем не менее, как отмечает Ф. Дайсон, вопрос о том, почему хаос, наблюдаемый в самых различных динамических системах, остается, как правило, "слабым", до настоящего времени остается открытым. С учетом важности проблемы с точки зрения геофизических приложений попытаемся все же его конкретизировать, по крайней мере, в отношении геосреды.

Важнейшее свойство сложных динамических систем — их нелинейность. Как известно, целесообразно различать три типа нелинейности: геометрическую, физическую и структурную [Руденко, 2006].

При этом каждая из них может быть распределена в пространстве или сконцентрирована в некоторой его области. Имеется ряд причин, приводящих к появлению больших или даже гигантских объемных нелинейностей структурно-неоднородных сред. К примеру, в жидкостях структурная нелинейность возникает при наличии в ней сильно сжимаемых включений, например пузырьков газа. И вообще, отмечается значительный рост нелинейности сред, со-

держащих сильно сжимаемые включения. Еще один важный с точки зрения приложений пример сред с большой структурной нелинейностью — это трещиноватые среды. Имеются прямые экспериментальные подтверждения усиления нелинейных свойств среды с увеличением числа трещин [Руденко, 2006].

Нарушив режим функционирования рассматриваемой системы малым возмущением, вначале, возможно, и будем регистрировать нарастание возмущений в ней. Но это нарастание будет наблюдаться до тех пор, пока в действие не вступит естественный их ограничитель — нелинейности — тот или иной (или все три) механизма. В силу ограниченности энергетического потока и энергонасыщенности среды нарастание амплитуды возмущений должно прекратиться или смениться уменьшением их амплитуды. Энергетическая и флюидная подпитка вызывает увеличение неравновесности и неустойчивости системы. Рост неустойчивости приводит к формированию флуктуаций ее параметров и генерации физических полей, которые преобразуются в автоволны, вид и свойства которых определяются самой системой. Они взаимодействуют между собой. Пересекаясь во времени и пространстве, сильные возмущения начинают взаимодействовать, обмениваться энергией, возможно возникновение излучений различной природы непосредственно из областей их взаимодействия в виде новых спектральных компонент. Автоволны, встретившись между собой, гасят друг друга, и имеющейся энергии уже не хватает на увеличение их амплитуды. В неоднородной среде "выживает" наиболее устойчивая и геометрически простая конфигурация со стоячими волнами. Следует отметить также наличие механизмов, переносящих энергию колебаний в более низкочастотную или более высокочастотную области спектра.

Таким образом, нелинейность усиливает поглощение энергии колебаний в геосреде, гигантская нелинейность сильно увеличивает его. В итоге любой новый режим функционирования системы будет иметь конечную амплитуду флуктуаций с нелинейным ограничением нарастания возмущений в ней.

О регуляции сейсмичности. Итак, приведенные экспериментальные данные дают основание говорить о неустойчивости сейсмического процесса. Основной переменной фактор, определяющий и поддерживающий текущую нестабильность среды, — это восходящие потоки легких газов. Процессы дегазации носят

монотонный характер, на фоне которого проявляются импульсы дегазации на различных пространственных масштабах — от регионального до локального. В итоге меняются параметры контактного взаимодействия блоков, которые в значительной степени зависят от интенсивности и скорости процессов дегазации и уровня внешних полей (приливы, метеофакторы, тектоническая деформация, отдаленная сейсмичность и др.). В процессе перестройки структуры геосреды возникают флуктуации акустической и электромагнитной эмиссий (геометрический шум литосферы, одна из моделей описания которого связана с перколяционной моделью диффузионного фронта). В качестве его модели (фронта самоорганизованной критичности) используют фронты градиентной скалярной перколяции. Существенно, что геометрический — акустический и электромагнитный шум — это универсальный эффект. Он обусловлен только наличием диффузии.

Пороговый характер самоорганизующихся процессов термодинамика связывает с неустойчивостью. Появление новых структур есть результат неустойчивости и флуктуаций. В "допороговом" состоянии флуктуации затухают, а выше порога уже не исчезают, а усиливаются и выводят систему на новый режим. В итоге в принципиальном плане возможно влияние на процессы формирования и распада крупномасштабных структур разрушения. Анализ сейсмического режима по таким параметрам, как сейсмические бреши и затишье, миграция очагов, кольцевая сейсмичность, миграция очагов слабых землетрясений, указывают на значительную неопределенность в оценке сейсмической опасности по времени и месту события. В геосреде существуют комплексы нелинейных взаимодействий между физическими полями, структурами и подсистемами.

Прохождение достаточно слабых упругих сейсмических и электромагнитных импульсов (волн) влияет на динамику восходящих оттоков легких газов и, соответственно, на изменение объемно-напряженного состояния геосреды [Тарасов и др., 2001; Авагимов и др., 2005; Гуфельд, 2007].

К специфическим целям регуляции в геосреде может быть отнесено изменение сейсмичности различного ранга, связанной с разрушением связанного состояния блоков геосреды [Гуфельд, 2007]. При этом можно говорить об управляемости геосистемы, если при вариации входных параметров в диапазоне допустимых значений (по оценкам Гуфельда [Гу-

фельд, 2007], на кинетику восходящего потока легких газов могут оказывать влияние весьма слабые источники сейсмических и электромагнитных волн с энергией $E \approx 10^{-5} kT$, где k — постоянная Больцмана, T — температура) область изменения выходного параметра охватывает значения, соответствующие желательному режиму функционирования системы. Очевидно, при таком подходе управление или регуляция еще не является таковым. Существует лишь принципиальная возможность достижения желаемой цели, в частности влияние (в определенных пределах) на формирование и распад крупномасштабных структур разрушения. Важно, что воздействие необходимо оказывать не на всю крупномасштабную структуру, а только на ее отдельные фрагменты, являющиеся главным препятствием к взаимному смещению блоков [Гуфельд, 2007]. В этом случае уместно говорить об ослабленной постановке задачи: создание режимов функционирования системы с заданными характеристиками или качественное изменение ее фазового портрета при минимальных значениях управляющего параметра.

Как известно [Фрадков, 2005], в физических задачах встречаются несколько типов управления системами. Значительное влияние уделялось исследованиям виброиндуцированных или шумоиндуцированных эффектов, которые интерпретировались как задачи управления с управляющей функцией, зависящей только от времени. К таким эффектам могут быть отнесены виброиндуцированный или вибрационный резонанс, стохастический резонанс, синхронизация под действием внешней периодической или случайной силы и другие [Фрадков, 2005].

Получило распространение управление с медленно изменяющейся частотой (динамический авторезонанс или чирпинг). Известно управляющее воздействие, в котором при вычислении отклика системы используются результаты измерений объекта управления или его выходов (наблюдаемых). В конечном итоге при решении задачи управления ставится цель нахождения управляющей функции с минимальной нормой, обеспечивающей достижение заданного поведения системы. Однако трудности управления процессами в геосреде в условиях реального эксперимента усугубляются ограниченностью или невозможностью локального контроля и влияния. Главное здесь — за счет контролируемого воздействия уменьшить размер пространственно-связанной блочной структуры. В этих условиях может оказаться эффек-

тивной подача воздействия с медленно изменяющейся частотой. Иначе говоря, создание в нелинейной динамической системе (геосреде) колебаний, варьируя частоту внешнего воздействия в зависимости от амплитуды колебаний в ней (воздействие в виде обратной связи). Интерес представляют оценки совместного влияния на среду контролируемого и естественных источников (микросейсм и приливных явлений). В этом случае возможен эффект стохастического резонанса (СР), представляющего собой фундаментально общее физическое явление, при котором отклик нелинейной системы на слабый внешний сигнал заметно усиливается с ростом интенсивности шума в системе. В частности, в отсутствие шума амплитуда вводимого в систему импульса может оказаться недостаточной для достижения порогового значения. С добавлением шума преодоление порога становится возможным [Анищенко и др., 1999]. При этом коэффициент усиления (отношение сигнал/шум) имеет четко выраженный максимум при некотором оптимальном уровне шума в системе.

Установлено также, что наличие источников шума в нелинейной динамической системе может индуцировать принципиально новые режимы ее функционирования, которые не могут быть реализованы в отсутствие шума, например индуцированные шумом слабозатухающие колебания. Как известно, эффекты такого рода получили название индуцированных шумом переходов [Анищенко и др., 1999].

Но, к сожалению, при отсутствии уравнений процесса воспользоваться или предусмотреть явление достаточно проблематично. Здесь может оказаться эффективным подход, основанный на подаче воздействующего сигнала с медленно изменяющейся частотой (динамический авторезонанс). Иначе говоря, идея состоит в том, чтобы создавать колебания в нелинейной системе (геосреде), изменяя частоту внешнего воздействия в зависимости от амплитуды колебаний в ней.

О технологии воздействия. Как уже упоминалось, имеются веские основания думать, что сейсмичность любого ранга или уровня индуцируется фоновыми полями и обусловлена пространственной и временной неравномерностью восходящих потоков легких газов [Гуфельд, 2007; Гуфельд, Матвеева, 2011; Gufeld et al., 2011]. В итоге можно предположить, что образование пространственной структуры блоков в значительной степени зависит и определяется интенсивностью и скоростью процессов дегазации и уровнем внешних полей в дан-

ный момент времени. Отражением появления этой пространственно связанной структуры могут быть кольцевая сейсмичность, относительное сейсмическое затишье, сейсмические бреши, исчезновение суточных ходов геоакустической и электромагнитной эмиссии и другие факторы [Gufeld et al., 2011; Шаповал, 2011]. Однако сейчас вряд ли возможно ответить на вопрос о том, в каком месте и на какой границе произойдет разрушение этой пространственно-временной структуры. В то же время можно считать установленной возможность влияния на процессы формирования и распада крупномасштабных структур путем воздействия на параметры входящих потоков легких газов и процессы дегазации в геосреде.

В рассматриваемом контексте значительный интерес представляют исследования вибро- или шумоиндуцированных эффектов, которые, согласно [Фрадков, 2005, с. 118], можно интерпретировать как задачу воздействия с управляющей функцией, зависящей только от времени: виброиндуцированный (вибрационный) резонанс, стохастический резонанс, шумоиндуцированные переходы, синхронизация с учетом действия внешних естественных периодических (в частности, приливных) или случайных сил (магнитные бури, перепады атмосферного давления и др.). Все эти эффекты существенно влияют на интенсивность и скорость процессов дегазации и, соответственно, способны коренным образом менять сейсмотектоническую обстановку — от фоновой до критической. Очевидно, определяющую роль здесь имеет то обстоятельство, что акустические возмущения способны проникать в те области геосреды, которые являются непрозрачными для иных видов излучений, в частности электромагнитного. Вопрос только в том, как эффективно возбуждать в геосреде сейсмоакустические колебания нужной интенсивности и частоты. В отличие от традиционно используемых и известных технических способов возбуждения ультразвуковых колебаний в среде с применением пьезоэлектрических или магнитострикционных преобразователей может оказаться наиболее эффективным способ, основанный на явлении взаимной трансформации электромагнитных и упругих полей в материальной среде, в частности, электромагнитно-акустического и акусто-электромагнитного преобразования на границе проводника (ЭМАП) [Васильев, Гайдуков, 1983; Каганов, Васильев, 1993].

Суть ЭМАП состоит в том, что в среде, не обладающей ни пьезоэлектрическими, ни маг-

нитострикционными свойствами, под действием падающей электромагнитной волны возбуждаются ультразвуковые волны той же или кратной частоты. При этом наличие границы раздела сред (в нашем случае "земля—воздух") как места сосредоточения возбуждающей силы имеет принципиальное значение.

Нетривиальность этого преобразования как физического явления определяется рядом обстоятельств. Во-первых, электромагнитное возмущение (волна), падающее на границу раздела, возбуждает акустические колебания электрически нейтрального тела. Во-вторых, число механизмов, обеспечивающих взаимное преобразование электромагнитных и акустических волн в проводнике, достаточно велико. В-третьих, эффекты, наблюдаемые при изучении его чисто акустических свойств (затухания, скоростей распространения ультразвука), проявляются иногда более отчетливо и выразительно именно в ЭМАП. Последнее обстоятельство, как известно, существенно при разработке методов неразрушающего контроля [Комаров, 1986] и в геофизических приложениях [Шуман, 2012 в]. Важно, что упругое поле содержит как компоненты, сосредоточенные в пределах скин-слоя падающей электромагнитной волны, так и возмущения, бегущие за его пределы со звуковой скоростью.

Основой теоретического исследования ЭМАП является связанная система уравнений теории упругости и уравнений Максвелла, описывающая возбуждение, распространение и взаимодействие распространяющихся возмущений. Установлено, что с точки зрения интенсивности возбуждаемого таким способом в среде ультразвука особенно эффективна генерация стоячих звуковых волн в слоистой структуре. Созданной в ней таким образом звуковой волне сопутствует также электромагнитное поле, характеризующее звуковым законом дисперсии и столь же слабо, как и звуковое, затухающее в пространстве. Его амплитуда в условиях резонанса может оказаться весьма существенной. В работе А. А. Колесникова [Колесников, 2009] приведена следующая простая формула для оценки акустического давления P ЭМАП (μ Па) в плоском фрагменте скин-слоя размером $a \times a$ и толщиной b для тока I_0 (A / μ) формы униполярного меандра скважности τ^{-1} с основной частотой ω_1 :

$$p = \frac{\mu}{8} \left(\frac{I_0}{a} \right)^2 \{ (1 - \delta_1 / b) \times$$

$$\times [1 + \operatorname{sgn} (\cos \omega_1 t)] \}, \quad (1)$$

получена на основе пондемоторной силы Ампера, где μ — магнитная проницаемость среды; σ — ее проводимость; δ_1 — эффективная толщина скин-слоя на частоте ω_1 , $\delta_1 = \sqrt{2 / (\mu \sigma \omega_1)}$. При этом, как уже обсуждалось, нас не должна смущать кажущаяся проблема несоответствия энергетических масштабов процессов в геосреде и мощности p регулятивного импульса: важен поиск частотного оптимума влияния на динамику восходящих потоков легких газов. Заметим также, что, как свидетельствует эксперимент, наблюдается существенное превышение эффективности ЭМАП над его теоретическими оценками [Каганов, Васильев, 1993].

Вторая возможность возбуждения ультразвука в геосреде — когда электромагнитное поле генерируется индуктивной катушкой, расположенной у границы раздела "земля—воздух" или на ее поверхности. Очевидно, первостепенный интерес представляет анализ суммарного воздействия регулятивных сигналов контролируемого источника и шумов различной природы, хотя вопрос о пороге регуляции по существу остается открытым и должен решаться экспериментально. Определяющим здесь может оказаться не только выбор источника воздействия, но и контроль необходимой (или доступной) группы параметров, характеризующих текущее состояние среды. И здесь на передний план выходят методы идентификации геосреды с непрерывно изменяющимися параметрами.

Алгоритмы воздействия и управления.

Согласно [Фрадков, 2005], говоря об управлении в распределенных системах, обычно имеется в виду, что в них выделен некоторый параметр, называемый входным или управляющим, вариации которого ведут к изменению некоторой характеристики поведения системы, называемой выходным. В столь ослабленной постановке задачи говорится лишь о принципиальной возможности достижения заданного выхода или результата. Применительно к задачам рассматриваемого типа в качестве входного параметра, очевидно, можно выбрать генерируемую тем или иным способом систему слабых импульсных или периодических акустических сигналов с меняющейся частотой, а в качестве выходного — вариации параметров восходящих потоков легких газов, которые, в свою очередь, вызывают изменения ОНС среды, влияя тем самым на ее пространственно-связанную блочную структуру. При этом, как уже отмечалось, наиболее широкими возможностями об-

лаждает управляющее воздействие, вызываемое прохождением слабых упругих волн или электромагнитных импульсов, при котором его характеристики (скважность, частота, интенсивность) оказываются согласованными с текущим состоянием системы, в частности с уровнем шумов в ней (управление с обратной связью или по состоянию — state feed back, или по выходу, характеристикам наблюдаемых временных рядов, характеризующих состояние системы — output feed back) [Фрадков, 2005]. При этом изменение слабой сейсмичности не может быть единственным критерием эффективности воздействия. Понятно, что в плане практической реализации задачи проблемы прогноза сейсмичности и ее регулирования тесно связаны [Гуфельд, 2007]. В этих условиях для синтеза управляющего воздействия недостаточно располагать моделью объекта управления.

Типичным классом моделей активных систем с диффузией являются уравнения "реакция—диффузия" [Кернер, Осипов, 1989; Фрадков, 2005]. При рассмотрении систем с диссипацией и в особенности возникновения флуктуаций особая роль принадлежит флуктуационно-диссипативной теореме статистической физики, связывающей спонтанные флуктуации параметров системы с ее диссипативными свойствами [Ильинский, Келдыш, 1989; Кадомцев, 1994], смысл которой состоит в том, что механизм любой диссипации является одновременно и механизмом рождения флуктуаций.

Таким образом, и сейсмоакустический, и электромагнитный шум литосферного происхождения — это универсальный эффект, обусловленный наличием диффузии [Шуман, 2012 а; б]. В частности, предполагается, что источниками сейсмоакустической эмиссии являются фронты переупаковки пород или фронты критичности. При этом критическое состояние на фронте возникает самопроизвольно при внешних энергетических воздействиях, обусловленных, очевидно, и восходящим потоком легких газов, а в качестве модели фронта самоорганизованной критичности предлагается использовать фронты градиентной скалярной перколяции [Гийон и др., 1991; Мухамедов, 1992]. С другой стороны, с фронтом самоорганизованной критичности (градиентной перколяции) связано формирование фронта волны тензора комплексной диэлектрической проницаемости, рассеивающейся на отдельных зарядах, сгустках зарядов, электрических диполей, присутствующих в среде или возникающих в ней в процессе распространения фронта самоорганизованной критичности,

порождают электромагнитные, а в принципе, и другие типы волн [Гинзбург, Цытович, 1984].

Таким образом, имеются веские основания предполагать, что динамика и интенсивность спонтанного электромагнитного излучения литосферного происхождения тесно связаны и определяются динамикой восходящих потоков легких газов, являющихся объектом воздействия. Как установлено, основные закономерности генерации спонтанного ЭМИ литосферного происхождения могут быть воспроизведены в рамках двух-трехкомпонентной системы уравнений, которую в простейшем случае можно записать в следующем виде [Цифра, Шуман, 2010; Шуман, 2012 б]:

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

$$\frac{\partial G_i}{\partial t} = \beta_{ij} \nabla^2 J_j + \varepsilon P_i(\mathbf{B}, \mathbf{G}), \quad (2)$$

где B_i — индукция; α_{ij} и β_{ij} — матрицы диффузии магнитного поля и флюидной компоненты; $F_i(\mathbf{B}, \mathbf{G})$ — сильно нелинейная функция величин \mathbf{B} и \mathbf{G} , явным образом независимая от пространственных координат и времени; G — концентрация флюидной компоненты. При этом функция $P_i(\mathbf{B}, \mathbf{G})$ может изменяться скачком в некоторый момент времени, быть монотонной или даже константой. Предельный случай, когда $\varepsilon = 0$, соответствует однокомпонентной системе; ∇^2 — оператор Лапласа, задающий диффузионный тип пространственного взаимодействия.

Как известно, системы, свойства которых описываются уравнениями (2), в которых реализуются яркие нелинейные явления, принято называть активными системами с диффузией [Кернер, Осипов, 1989]. Установлено, что в рассматриваемом классе систем реализуются два типа нелинейных явлений: спонтанное образование автоструктур и вынужденное образование различного рода автосолитонов и сложных автоволн, в частности возникновение автоструктур большой амплитуды [Кернер, Осипов, 1989]. Обзор возможных подходов к ее решению, а также анализ некоторых особенностей этой системы приведены в работе [Цифра, Шуман, 2010]. В частности, использование симметричного подхода при анализе системы (1) позволяет в ряде случаев свести эту систему к изучению системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Однако задача уп-

равления распределенной активной системой с диффузией на основе системы уравнений (2) остается исключительно трудной как в вычислительном, так и в технологическом отношении. Очевидно, одна из главных проблем — это трудности, связанные с диагностикой состояния системы, ее мониторинга и реализацией управляющего воздействия на относительно коротких промежутках времени. Они усугубляются необходимостью выделения литосферной компоненты электромагнитного излучения на фоне внешних мощных источников излучений, а также необходимостью ввода управляющего воздействия на ненагруженный поверхностный слой земной коры, сильно фильтрующий сигнал управления. Следующий важный аспект проблемы — необходимость синтеза задачи прогноза (желательно краткосрочного) и управления (влияния) [Шуман, 2011 а, б]. Здесь крайне необходим поиск предикторов сейсмических событий, обладающих физическим смыслом, анализ совокупности теоретических и экспериментальных фактов, определение каких-либо качественных или количественных параметров будущего поведения системы на основе имеющегося массива накопленных данных.

Заключение. В рамках физико-химической модели сейсмического процесса проанализированы основные особенности задачи воздействия или влияния на его параметры, представлены некоторые подходы к ее решению. Так как в одной, даже обширной журнальной публикации невозможно осветить все многообразие исследований по этой теме, ее рассмотрение, в основном, ведется в рамках предложенной И. Л. Гуфельдом физико-химической модели сейсмичности. Согласно этой модели, сейсмичность любого уровня в основном контролируется интенсивностью восходящих потоков легких газов, их пространственной распределенностью и степенью разгрузки в приповерхностных слоях земной коры. В качестве ведущего процесса рассматривается взаимодействие блоков. Здесь мы неизбежно сталкиваемся с переходом к нелинейным моделям геосреды и протекающими в ней процессами. Новые постановки задачи потребовали введения новых понятий и описания новых эффектов. В частности, сейсмическая и электромагнитная эмиссия обладают ярко выраженными свойствами нелинейных процессов, способностью к самоорганизации и хаотизации, характерному поведению при приближении к сильному сейсмическому событию и после него. Очевидно, в этой ситуации весьма проблематично пост-

роить математическую модель процесса, которая была бы одновременно и реалистичной, и поддающейся анализу. Типичная формулировка задачи воздействия на сейсмичность или управления им: найти управляющую функцию с минимальной нормой, обеспечивающей достижение заданного поведения геосистемы, к примеру формирования или распада крупномасштабных структур разрушения в земной коре. Главное в управлении сейсмичностью — восстановить режим фонового движения блоков. Перспективы в решении этой задачи связаны с высокой чувствительностью пространственно-связанной блочной структуры к внешним воздействиям — естественным и контролируемым.

Естественно, здесь мы сталкиваемся с такими вопросами геотехнического плана, как, во-первых, чем управлять при воздействиях на среду и как это реализовать на практике. Весьма вероятно, этого можно достичь путем воздействия на параметры восходящих потоков легких газов, которые, собственно говоря, и формируют пространственно-связанную блочную структуру и определяют ее эволюцию. И здесь мы сталкиваемся с необходимостью рассмотрения общих вопросов управления физическими системами, теории управления в физике и их адаптацией к реальной геофизической среде.

В качестве теоретической основы влияния на сейсмичность предлагается режим фоновой регуляции процессов дегазации ультраслабыми акустическими сигналами, генерируемыми в скин-слое контролируемого источника в результате интегрального эффекта электромагнитно-акустического преобразования и распространяющимися за его пределами. Весьма важно, что это упругое поле содержит как компоненты, сосредоточенные в скинслое источника, так и волны, распространяющиеся вглубь среды, т. е. в области, непрозрачные для электромагнитного и других типов излучений. При этом управляющее воздействие может быть не энергетически мощным, а правильно топологически и технологически организованным. Иначе говоря, не энергия воздействия, определяемая как интеграл от спектральной плотности мощности в полосе измеряемых частот, а его конфигурация и архитектура наиболее существенны. И здесь на передний план выступает совместное воздействие управляющего сигнала, шумов различной природы и периодических внешних сил (приливы, метеофакторы и др.). В итоге проявляется весьма деликатное взаимодействие и согласование проблем прогноза сейсмичности и контролируемого воздействия на

нее, причем отклик геосреды на такое воздействие может быть различным в зависимости от условий, в которых она находится в заданный момент времени.

Трудности усугубляются тем обстоятельством, что краткосрочный прогноз сейсмического события в ближайшей перспективе вряд ли реализуем, и мы вынуждены действовать в условиях неопределенности. В качестве фактора, облегчающего решение задачи, могут выступать кольцевая сейсмичность, относительное сейсмическое затишье, сейсмические бреши, нару-

шение или исчезновение суточного хода геоакустических и электромагнитных шумов, другие параметры. В этом контексте предельно обнажена необходимость комплексного мониторинга, количественная достаточность получаемых параметров, которая, очевидно, может быть установлена лишь на основе представлений физики сейсмического процесса. С дальнейшим развитием этих направлений и связаны надежды на решение проблемы снижения сейсмической опасности или, по меньшей мере, перевода ее в практическую, геоинженерную плоскость.

Список литературы

- Авагимов А. А., Зейгарник В. А., Файнберг Э. Б. О пространственно-временной структуре сейсмичности, вызванной электромагнитным воздействием // Физика Земли. — 2005. — № 6. — С. 55—65.
- Анищенко В. С. Детерминированный хаос // Современный образовательный журнал. — 1997. — № 6. — С. 70—76.
- 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—38.
- Васильев А. Н., Гайдуков Ю. Электромагнитное возбуждение звука в металлах // Успехи физ. наук. — 1983. — 141, вып. 3. — С. 431—467.
- 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. — 161, № 10. — С. 121—128.
- Гинзбург В. Л., Цытович В. Н. Переходное излучение и переходное рассеяние (некоторые вопросы теории). — Москва: Наука, 1984. — 360 с.
- Голицын Г. С. О распределении числа литосферных плит по размерам // Физика Земли. — 2008. — № 3. — С. 3—8.
- Гольдин С. В. Дилатансия, переупаковка, землетрясения // Физика Земли. — 2004. — № 10. — С. 37—54.
- Гуфельд И. Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. — Королев: ЦНИИМам, 2007. — 160 с.
- Гуфельд И. Л., Матвеева М. И. Барьерный эффект дегазации и деструкция земной коры // Докл. РАН. — 2011. — 438, № 2. — С. 253—257.
- Дайсон Ф. Птицы и лягушки в математике и физике // Успехи физ. наук. — 2010. — 180, № 8. — С. 859—870.
- Дмитриевский А. Н., Вологин И. А. Автосолиitonные механизмы дегазации Земли // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы. Матер. Всерос. конф. (Москва, 22—25 апреля 2008 г.). — Москва: ГЕОС, 2008. — С. 152—154.
- Закржевская Н. А., Соболев Г. А. О возможном влиянии магнитных бурь на сейсмичность // Физика Земли. — 2002. — № 4. — С. 3—15.
- Зосимов В. В., Лямшев Л. М. Фракталы в волновых процессах // Успехи физ. наук. — 1995. — 165, № 4. — С. 361—401.
- Изаков М. Н. Самоорганизация и информация на планетах и в экосистемах // Успехи физ. наук. — 1997. — 167, № 10. — С. 1087—1094.
- Ильинский Ю. А., Келдыш Л. В. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом. — Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1989. — 304 с.
- Каганов М. И., Васильев А. Н. Электромагнитно-акустическое преобразование — результат действия поверхностной силы // Успехи физ. наук. — 1993. — 163, № 10. — С. 67—80.

- Кагомцев Б. Б. Динамика и информация // Успехи физ. наук. — 1994. — **164**, № 5. — С. 449—530.
- Кернер Б. С., Осипов В. В. Автосолитоны // Успехи физ. наук. — 1989. — **157**, вып. 2. — С. 201—261.
- Колесников А. А. Фоновая акустическая регуляция физико-химических процессов в конденсированных системах: Автореф. дис. ... д-ра хим. наук. — Санкт-Петербургский гос. технол. ин-т (Технический университет). — Санкт-Петербург, 2009. — 38 с.
- Комаров В. А. Электромагнитно-акустическое преобразование — метод неразрушающего контроля // Успехи физ. наук. — 1986. — **150**, вып. 1. — С. 164—166.
- Кравцов Ю. А. Случайность, детерминированность, предсказуемость // Успехи физ. наук. — 1989. — **158**, вып. 1. — С. 93—121.
- Лоскутов А. Ю. Очарование хаоса // Успехи физ. наук. — 2010. — **180**, № 2. — С. 1305—1329.
- Лукк А. А., Дещерский А. В., Сигорин А. Я., Сигорин И. А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. — Москва: ОИФЗ РАН, 1996. — 210 с.
- Мирзоев К. М., Николаев А. В., Лукк А. А., Юнга С. Л. Наведенная сейсмичность и возможности регулируемой разрядки накопленных тектонических напряжений в земной коре // Физика Земли. — 2009. — № 10. — С. 39—49.
- Мухамедов В. А. О фрактальных свойствах высокочастотного сейсмического шума и механизмах его генерации // Физика Земли. — 1992. — № 3. — С. 39—49.
- Николаев А. В. Инициирование землетрясений подземными ядерными взрывами // Вестн. РАН. — 1993. — **63**, № 2. — С. 113—116.
- Николаев А. В. О возможности искусственной разрядки тектонических напряжений с помощью электрических и сейсмических воздействий // Двойные технологии. — 1999, № 2. — С. 6—10.
- Николаев А. В. Развитие методов нелинейной геофизики // Электрон. науч.-информ. журн. "Вестник ОГГН РАН". — 2002. — № 1 (20).
- 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.
- Тарасов Н. Т., Тарасова Н. В., Авагимов А. А. Влияние мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность // Вулканология и сейсмология. — 1999. — № 4—5. — С. 152—160.
- Тарасов Н. Т., Тарасова Н. В., Авагимов А. А., Зейгарник В. А. Изменение сейсмичности Бишкекского геодинамического полигона при электромагнитном воздействии // Геология и геофизика. — 2001. — **42**, № 10. — С. 1641—1649.
- 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.
- Шаповал А. Б. Вопросы прогнозируемости в изотропных моделях с самоорганизованной критичностью: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН. — Москва, 2011. — 35 с.
- Шуман В. Н. Геосреда и сейсмический процесс: проблемы управления // Геофиз. журн. — 2011 а. — **33**, № 2. — С. 16—27.
- Шуман В. Н. Геосреда как открытая нелинейная диссипативная динамическая система — задачи идентификации, возможности управления, прогноз эволюции (обзор) // Геофиз. журн. — 2011 б. — **33**, № 5. — С. 35—50.
- Шуман В. Н. Электродинамика фрактальных сред, переходное фрактальное рассеяние и электро-

- магнитный шум литосферы // Геофиз. журн. — 2012 а. — **34**, № 1. — С. 3—13.
- Шуман В.Н.* Электромагнитная эмиссия литосферы: всегда ли мы адекватно трактуем то, о чем как будто знаем? // Геофиз. журн. — 2012 б. — **34**, № 2. — С. 4—19.
- Шуман В.Н.* Электромагнитно-акустические преобразования и высокоразрешающие зондирующие системы: новые возможности и новые формулировки старых вопросов // Геофиз. журн. — 2012 в. — **34**, № 3. — С. 32—39.
- Gufeld I.L., Matveeva M.I., Novoselov O.N.* Why we cannot predict strong earthquakes in the Earth's crust // Geodynamics. Tectonophysics. — 2011. — **2**, № 4. — P. 378—415.
- Kagan Y.Y.* Observational evidence for earthquakes as a nonlinear dynamic process // Physica D. — 1994. — **77**. — P. 160—172.
- Keilis-Borok V.I.* Symptoms of instability in a system of earthquake-prone faults // Physica D. — 1994. — **77**. — P. 193—199.