

Электромагнитная эмиссия литосферы: всегда ли мы адекватно трактуем то, о чем как будто знаем?

© В. Н. Шуман, 2012

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина
Поступила 28 июня 2011 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

Встретившись с новой идеей, вы,
скорее всего, поступите правильно,
если выскажетесь против нее.

Генри Уивер

Розглянуто дискусійні питання генерації та поширення електромагнітних збурень, які реєструють на поверхні Землі або над нею в широкому діапазоні частот. Увагу зосереджено на одному із всієї сукупності компоненті флуктуацій — електромагнітному шумі літосферного походження як природного фізичного явища. Його появу інтерпретують у рамках моделі геосередовища як відкритої дисипативної дискретної фрактальної системи та з урахуванням відомої флуктуаційно-дисипативної теореми статистичної фізики, яка пов'язує спонтанні флуктуації параметрів системи з її дисипативними властивостями. Підкреслено спільність і взаємозв'язок процесів генерації і поширення сейсмоакустичного та електромагнітного шумів літосфери, які характеризуються широкодіапазонним фрактальним спектром і є продуктом механізму еволюції перколяції (фронта градієнтної перколяції). Зазначено, що ці процеси притаманні не лише власно фрактальним агрегатам, а й широкому класу середовищ з ієрархічною структурою. Обговорено результати експериментальних досліджень останніх років, у тому числі нові експериментальні дані щодо реєстрації електромагнітного випромінювання радіохвильового (кілогерцового) діапазону в межах акваторій Чорного та Азовського морів.

Debatable problems of generation and propagation of electromagnetic disturbances, which are registered on the earth's surface and above it within wide range of frequencies are being considered. Attention is focused on one fluctuation component of all totality — electromagnetic noise of lithospheric origin as natural physical phenomenon. Its origin is interpreted within the limits of model of geomedium as an open dissipative discrete fractal system and taking into account a well known fluctuation-dissipative theorem of statistical physics, which connects spontaneous fluctuations of system parameters with its dissipative properties. Generality and interrelation of processes of generation and propagation of seismo-acoustic and electromagnetic noises of lithosphere are accentuated, which are characterized by a wide-range fractal spectrum and are the product of a mechanism of evolution of percolation deployment (front of gradient percolation). It is noted that these processes are specific not only to properly fractal aggregates but to a wide class of media with hierarchic structure as well. Results of recent experimental studies are discussed including new experimental data on registration of electromagnetic emission of radio-wave (kilohertz) range within the aquatic area of the Black Sea and the Sea of Azov.

Введение. Проблемы неадекватности интерпретационных моделей, вопросы соотношения теории и эксперимента, взаимодействия мифов и реальности — не новость для работ геофизического цикла. Достаточно вспомнить в качестве примера идею «сверхразрешения» в теории электромагнитных зондирующих

систем [Шуман, 2003, Каменецкий, 1999], ряд моделей и механизмов связей в системе литосфера—атмосфера—ионосфера при сейсмической активности [Липеровский, 2006] или локального описания электромагнитного МТ-отклика, регистрируемого на земной поверхности [Шуман, 2008; 2010б]. В последние

годы их число возросло в связи с изучением электромагнитных сигналов литосферного происхождения в широком диапазоне частот [Богданов и др., 2009а,б; Шуман, 2010в,г].

К сожалению, неадекватность присуща не только частным, но и базовым интерпретационным моделям [Шуман, 2003]. При этом неадекватность интерпретационных моделей может проявляться как в игнорировании экспериментальных данных, так и в абсолютизации частных моделей, многие из которых имеют лишь косвенное отношение к действительности, превращению их в некоторые универсальные шаблоны, пригодные на все случаи жизни. Кроме того, обильно представлена эмпирика без должного теоретического обоснования.

Как известно, теоретическое знание — это суть соединения эмпирики с неформальными идеями, базирующимися на обобщенном опыте. И здесь особая роль принадлежит парадоксам — неожиданным суждениям, противоречащим общепринятым представлениям. Наиболее интересные из них — парадоксы типа теория—опыт, для которых характерно противоречие между теоретическими представлениями и экспериментом или интуицией. Хороший пример — ситуация, возникшая при изучении электромагнитного шума на акваториях, когда трасса распространения излучения литосферного происхождения при его выходе на водную поверхность включает интервал, соответствующий хорошо проводящему слою морской воды. Здесь особенно рельефно проявляется ситуация, когда явления, которые, по мнению многих исследователей, невозможны, обнаруживаются в эксперименте [Ершов, 2008; Ершов и др., 2010; Паламарчук, Кирейтов, 2010; Шуман и др., 2011].

В этой связи уместна постановка, по крайней мере, двух вопросов. Первый — можно ли получить информацию о строении и динамике литосферы под дном моря или океана, регистрируя электромагнитное излучение на поверхности водной среды или даже над ней, в атмосфере? И второй — как эти сигналы проявляются на этой границе раздела, и о чем свидетельствует натурный эксперимент? Парадоксально, но принципиально можно дать положительный ответ на первый из них и предложить механизмы выноса электромагнитной компоненты излучений на поверхность морской среды и в атмосферу при ответе на второй [Ершов и др., 2010; Паламарчук, Кирейтов, 2010; Шуман и др., 2011]. Тем не менее, все еще остается ряд трудных вопросов физики

геомагнитных флуктуаций, относящихся к механизмам их генерации, «сверхдальнего» распространения, глубинной привязки источников генерации, диагностики, требующих своего решения и вызывающих оживленные дискуссии [Богданов и др., 2009а,б; Шуман, 2010в,г]. Разумеется, здесь речь не может идти о спекуляциях, игнорирующих общепринятые физические принципы, в частности электродинамики материальных сред. При этом каждый из исследователей вправе придерживаться той или иной точки зрения, согласуя свои представления с новыми опытными данными.

Заметим также, что исследование электромагнитных флуктуаций литосферного происхождения является важной составной частью фундаментальной и прикладной геофизической науки, поскольку именно флуктуации динамических переменных геосреды определяют большой класс физических явлений, происходящих в ней.

Состояние проблемы. Как свидетельствует эксперимент, наблюдается большое разнообразие электромагнитных возмущений, регистрируемых на земной поверхности в широком диапазоне частот от 10^{-4} до 10^6 Гц и выше. Одни из них возбуждаются в атмосфере, другие — в магнитосфере и ионосфере в результате взаимодействия солнечного ветра с геомагнитным полем или проникновения в магнитосферу Земли из межпланетной среды, третьи генерируются внутриземными источниками [Atmospheric ..., 1999; Сурков, 2000; Gershenson, Vambakidis, 2001; Гульельми, 2007]. Регистрируются электромагнитные сигналы индустриального происхождения.

К источникам электромагнитного излучения обычно относят грозовые разряды, предгрозовое излучение, непрерывно-шумовое радиоизлучение грозовых облаков и циклонов. Физическую природу предгрозового и непрерывно-шумового излучений обычно связывают с колебаниями поверхностей заряженных капель воды, их дроблением и коагуляцией. Непрерывно-шумовое излучение грозовых облаков и циклонов наблюдается на частотах от сотен кГц до сотен МГц. Излучают радиоволны и различные светящиеся объекты, возникающие в атмосфере и имеющие пламенное происхождение. Однако наиболее мощные и постоянно действующие источники электромагнитного излучения сосредоточены в ионосфере и магнитосфере. Они генерируют так называемые геомагнитные пульсации — наиболее регулярные естественные поля в

диапазоне периодов от 0,3 до 600 с. Компонента электромагнитного излучения, источники которой находятся в верхнем полупространстве, содержит регулярную суточную и сезонную компоненты, особенности которых находят объяснение в соответствующих циклических изменениях грозовой активности на земном шаре, условиях распространения волн в волноводе земля—ионосфера, ионосферных и магнитосферных процессах.

Экспериментально установлено, что в структуре регистрируемых на дневной поверхности естественных импульсных электромагнитных полей высокую долю составляют также импульсы литосферного происхождения [Гохберг и др., 1979; 1985; 1988; Левшенко, 1995; Atmospheric ..., 1999; Сурков, 2000; Богданов и др., 2003; Гульельми, 2007; Шуман, 2007; 2010г; Шуман, Богданов, 2008]. Отмечается, что генерация электромагнитного шума в литосфере может происходить как спонтанно, вне прямой связи с проявлением сейсмичности, так и вынужденно, вследствие подвижек горных пород при сейсмическом воздействии [Левшенко, 1995; Сурков, 2000; Гульельми, 2007]. Предложена схема классификации регистрируемых сигналов [Левшенко, 1995]. Отмечается, что при описании теоретических подходов к изучению спонтанных сигналов авторы, как правило, ограничиваются лишь крайне схематичной, качественной стороной вопроса, в то время как «... путь изучения вынужденных сигналов литосферного происхождения в целом ясен» [Левшенко, 1995]. В последнем случае, в зависимости от того, приходят ли электромагнитные возмущения в пункт их регистрации из сейсмического очага, с фронта сейсмической волны или возбуждаются сейсмической волной непосредственно в окрестности точки наблюдения, они подразделяются на три вида, каждый из которых может возбуждаться в результате действия деформационного, индукционного или инерционного механизмов генерации. В свою очередь, механизмы генерации подразделяются в зависимости от того, какой тип движения земной коры ответственен за генерацию — за счет вектора перемещений элемента земной коры \mathbf{u} , скорости деформации $\mathbf{v} = d\mathbf{u}/dt$ и ускорения $\mathbf{w} = d\mathbf{v}/dt$.

Предложено общее линейное уравнение генерации, включающее все эти механизмы генерации [Левшенко, 1995; Гульельми, 2007]. Развита методика выделения сигналов литосферного происхождения на фоне интенсивных атмосферно-ионосферно-

магнитосферных возмущений, которые в этом случае выступают в роли помех. Она основана на использовании свойств однородности поля источников этого типа по площади, в то время как источники электромагнитных возмущений, расположенные в литосфере, генерируют поля с повышенным поверхностным градиентом. В частности, плоские неоднородные, вертикально поляризованные электромагнитные волны, возбуждаемые молниевыми разрядами, распространяются в сферическом волноводе «земля—ионосфера» с затуханием, не превышающим единиц децибел на тысячу километров. Поверхностный градиент полей геомагнитных пульсаций также не превышает нескольких единиц пикотесла на километр. Однако в том случае, если источник электромагнитного поля находится в земной коре, ситуация существенно иная: для трассы распространения в среде с удельным сопротивлением $\rho \sim 10^4 \div 10^3$ Ом·м, характерным для условий земной коры, на частотах $10^4 \text{—} 10^6$ Гц коэффициент затухания превышает $10^2 \text{—} 10^3$ дБ/км [Гохберг и др., 1985]. Ясно, что для выхода излучения этого диапазона на дневную поверхность необходимо предположить или существование в среде полей очень высоких напряженностей, или наличие волноводных каналов. Напомним, что возможность дальнего распространения излучений на расстояния, превосходящие мощность скин-слоя, в принципе может реализоваться в двух случаях. Во-первых, при наличии в среде немонотонной зависимости фазовой скорости волны от поперечных к направлению распространения координат (например, глубины) и, во-вторых, промежуточного «дисперсионного окна», в частотном диапазоне которого электромагнитные импульсы могут распространяться на значительные расстояния без существенных искажений [Шуман, Причепий, 2004]. Однако отмеченные обстоятельства отражают лишь специфический или, точнее, экзотический аспект проблемы. Поэтому внимание исследователей концентрировалось на рассмотрении ансамбля излучателей, в частности ансамбля раскрывающихся в очаге трещин, и реализации своеобразного эффекта «когерентного» усиления создаваемого или суммарного сигнала [Сурков, 2000]. При этом основное внимание традиционно уделялось СНЧ-диапазону (300 Гц—3 кГц) или еще более низким частотам, скин-глубина на которых в реальных геоэлектрических условиях может превышать десятки километров [Гохберг и др., 1988]. Что касается

использования с этой целью радиоизлучения с частотами десятки и сотни кГц и выше, то характерная мощность скин-слоя будет составлять первые сотни метров, и электромагнитные возмущения этого типа из-за сильного поглощения не могут выйти из глубинных очагов на дневную поверхность. В итоге сформировалось представление о том, что регистрируемое на поверхности Земли излучение скорее всего соответствует электромагнитным процессам, протекающим, в основном, вблизи этой границы [Гохберг и др., 1988, с. 17]. Но в приповерхностном слое «...трудно найти достаточное число источников радиоэмиссии и еще труднее связать ее с процессом подготовки землетрясения» [Сурков, 2000, с. 118]. Таким образом, скептицизм большинства исследователей в отношении связи этого излучения с землетрясениями, по мнению В. В. Суркова, достаточно обоснован и было бы преждевременным обсуждать эти явления.

В рассматриваемом контексте обратим внимание на важное обстоятельство: при рассмотрении вопросов распространения возмущений этого типа земная кора принималась в качестве пассивного континуума. Это — пористая влагонасыщенная среда, обладающая магнитной структурой и находящаяся в подмагничивающем поле земного ядра. Именно применительно к такой модели реальной среды А. В. Гульельми и В. Т. Левшенко предложили общее уравнение генерации электромагнитных сигналов литосферного происхождения и проанализировали эффективность механизмов генерации [Левшенко, 1995; Гульельми, 2007].

Разумеется, в рамках классической электродинамической теории нет особых причин для сомнений или беспокойства по этому поводу. Использование такой модели вполне допустимо и оправдано, но, как оказалось, далеко не всегда. Как свидетельствует обширный натурный эксперимент, в суммарном излучении присутствует составляющая, обладающая специфическими свойствами и нуждающаяся в более подробном рассмотрении [Богданов и др., 2003; 2009а,б; Шуман, 2007; 2008; 2010а; Старостенко и др., 2009]. И, прежде всего, это касается электродинамической модели геосреды — активной диссипативной структуры [Шуман, 2010в,г]. Согласно В. Т. Левшенко [Левшенко, 1995], теоретические подходы к анализу спонтанных литосферных сигналов этого типа неизвестны и в схеме классификации, предложенной им, обозначены значком ?.

Кажется очевидным, что одним из перспек-

тивных направлений исследований этого типа является подход, основанный на идеях нелинейной динамики. Концептуальная новизна данного подхода состоит в том, что проблему генерации и распространения электромагнитного шума литосферы предполагается решать в рамках распределенных возбудимых сред (диссипативных структур) с учетом многообразия механоэлектромагнитных преобразований и эмпирических закономерностей, свидетельствующих о связи характеристик излучения со структурой и динамикой геосистем, которые не могут быть поняты и объяснены в рамках классической теории скин-эффекта. Ясно, что в этом случае на передний план выступают неустойчивые системы и возбудимые среды, демонстрирующие большое разнообразие типов поведения и самоорганизации.

Некоторые результаты экспериментальных исследований последних лет. В последние годы с использованием в качестве носителя измерительной аппаратуры наземные, воздушные и водные виды транспорта ООО «Юг-нефтегазгеология» выполнен большой объем точечных, профильных и площадных исследований по регистрации электромагнитного излучения на земной поверхности и над ней, являющихся уникальными как по объему и географии, так и по характеру полученной информации [Богданов и др., 2007; 2009а,б; Старостенко и др., 2009; Коболев, 2011; Шуман и др., 2011]. Регистрация излучения осуществлялась измерительным комплексом «Астрогон», включающим регистратор, приемник GPS и интерфейсный адаптер, обеспечивающим высокую технологичность и автономность проведения измерений. Регистратор измеряет интенсивность импульсного потока, отображающего количество импульсов электромагнитного излучения в единицу времени (обычно 1 с) с амплитудой, превышающей заданный порог (обычно выше 5 мкВ). На основе современной элементной базы и цифровой обработки данных удалось достичь высокой точности ($\pm 5\%$) и большого динамического диапазона (0,055—15 нТл) измерений параметров геомагнитных флуктуаций в диапазоне частот 1,5—70 кГц (по уровню 3 дБ) [Богданов и др., 2009а]. Силами ООО «Юг-нефтегазгеология» с использованием комплекса «Астрогон» и самолета Х-32-912 выполнены измерения распределения интенсивности излучения на региональном профиле МОГТ Лозовая—Шебелинка—Старопокровка длиной 190 км, вдоль линии регионального профиля ГСЗ «DOBRE» от восточной границы

Украины через Донбасс до Азовского моря длиной 360 км в двух направлениях (с северо-востока на юго-запад и обратно) на высотах 300 и 800 м [Старостенко и др., 2009].

Выполнен значительный объем измерений на серии профилей, пересекающих береговую линию Тарханкутского полуострова в субширотном направлении, а также вдоль линии субширотного профиля, пересекающего структуру Субботина на Прикерченском шельфе Черного моря и на южном окончании профиля «DOBRE» [Шуман и др., 2011].

Проведены измерения интенсивности излучения вдоль одного и того же профиля в северо-западной части Черного моря в 2007 и 2010 гг. соответственно с борта НИС «Владимир Паршин» [Богданов и др., 2007] и «Профессор Водяницкий» [Коболев, 2011]. Отмечается высокое сходство полученных записей. Полученные результаты измерений сопоставлялись с имеющимися сейсмогеологическими разрезами вдоль этих профилей [Старостенко и др., 2009; Шуман и др., 2011].

Эти результаты позволяют сделать следующие выводы:

- в составе регистрируемого суммарного сигнала на земной поверхности, над нею, на уровне моря и над ним значительную долю составляет компонента литосферного происхождения;
- распределение интенсивности излучения вдоль профилей обладает упорядоченной структурой, тесно связанной со строением и динамикой геосреды, при этом пространственные размеры и форма аномалий может служить основой для восстановления элементов геометрии геологических объектов;
- геологические объекты, с которыми связаны аномалии интенсивности радиоизлучений, регистрируемые на дневной поверхности и над нею, располагаются, в том числе, и на глубинах, значительно превосходящих мощность скин-слоя в рассматриваемом диапазоне частот;
- и, наконец, возможно, главный результат экспериментальных исследований последних лет — это возможность получения информации о структуре геосреды под морским дном.

Заметим, что по крайней мере часть из приведенного перечня выводов подтверждается и экспериментальными данными, полученными другими авторами и в других регионах [Ершов, Новик, 2008; Ершов и др., 2010; Паламарчук,

Кирейтов, 2010]. Спутниковые измерения электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,1—20 кГц также указывают на то, что каждый тип структуры литосферы характеризуется особым характером распределения интенсивности излучения [Ларина и др., 2001].

Приведенные аргументы качественно меняют существо дела. Предельно ясно, что необходимы качественно новые представления и модели генерации и распространения излучений, которые бы позволили анализировать их пространственно-временную структуру и механизмы выхода на дневную поверхность. В итоге вырисовывается набор интересных вопросов, решение которых, очевидно, потребует более детального, чем это обычно принималось, понимания свойств геосреды и ее электродинамического описания, расширенных модельных представлений о механизмах и типах механоэлектромагнитных преобразований [Шуман, 2010в,г].

Геосреда и ее теоретические модели. В предыдущем разделе внимание концентрировалось на наиболее существенных результатах экспериментального исследования электромагнитных флуктуаций радиоволнового диапазона, регистрируемых на поверхности Земли, важных с точки зрения понимания проблемы их физических механизмов генерации и распространения. Следующий ее аспект — какова роль геосреды и ее строения в этом процессе.

Как известно, геосреда — очень специфический объект исследования [Даниленко, 1992; Старостенко и др., 2001; Садовский, 2004; Дубровский, Сергеев, 2006; Гуфельд, 2007; Стаховский, 2007; Кисин, 2008; Генштафт, 2009 и др.]. Это — несплошная, неоднородная, неизотропная структура, разбитая на блоки разной величины. Основная ее особенность — иерархическое распределение по размерам ее элементов (блоков), перемещающихся как единое целое и взаимодействующих в процессе перемещения. Эти перемещения сосредоточены, в основном, вдоль их границ и включают процессы дробления, деформации и пластического течения отдельностей, зацепления механической и физико-химической природы, объемного деформирования и разрушения в пограничных областях блоков. Анализ акустосейсмозлектромагнитной шумовой активности показывает ее высокую энергонасыщенность.

Неоднородность геосреды, насыщенность флюидами, действие приливных деформаций в системе Земля—Луна—Солнце, эндогенная активность Земли отражаются в непрерывном

изменении геофизических, гидрогеохимических и других полей на разных ее масштабных уровнях. При этом в качестве основного переменного фактора, определяющего текущую нестабильность геосреды вблизи состояния, близкого к критическому, очевидно может служить восходящий поток легких газов (водород, гелий), а изменчивость ее параметров, которая может быть быстрой, является результатом его непрерывного взаимодействия с твердой фазой литосферы [Гуфельд, 2007; Кисин, 2008]. Существенно, что энергия дегазации может быть эффективно переброшена вдоль шовных зон и глубинных разломов, быстро сконцентрирована и высвобождена со скоростью «взрывной или детонирующей волны» [Вол, Гилат, 2006].

Геосреда является активной. Согласно [Васильев и др., 1979], характерные признаки активных сред:

- наличие распределенного источника энергии или веществ, богатых энергией;
- каждый ее элемент находится в состоянии, далеком от термодинамического равновесия;
- связь между элементарными объемами осуществляется за счет процессов переноса.

Разумеется, при этом приходится рассматривать процессы в дискретной (блочной) среде и учитывать ее твердую, жидкую и газовые компоненты.

Геосреда — хороший пример открытой неравновесной системы со множеством самоорганизующихся структур. При этом под структурой системы (пятном организации, блуждающим по среде) обычно понимают способ организации ее элементов и характер связей между ними. Как известно [Кадомцев, 1994], для самоорганизации необходимо наличие двух элементов — энергии и негэнтропии (энтропии с обратным знаком). В литосфере самым мощным источником как энергии, так и негэнтропии является тепловой поток из земных недр. Он и приводит в действие механизмы самоорганизации в ней.

В любой реальной системе, в том числе геосреде, всегда идут необратимые диссипативные процессы (диффузия, вязкость, теплопроводность, химические реакции, фазовые переходы). Отличительные признаки нелинейных диссипативных систем — волновая (автоволновая) и резонансная природа процессов, большая роль малых возмущений. Такие системы способны формировать различные (в том числе

и хаотические) пространственно-временные структуры активности, представляющие собой импульсы и фронты возбуждения, неустойчивость которых приводит к установлению в системе самоподдерживающихся колебаний с определенной пространственной конфигурацией [Васильев и др., 1979]. При этом каждый из элементов системы генерирует последовательность импульсов возбуждения с различным интервалом следования.

Заметим, что термин «автоволновые импульсы» подчеркивает тот факт, что их характеристики (форма, скорость распространения) определяются, прежде всего, параметрами среды и практически не зависят от начальных и граничных условий. К настоящему времени известны следующие типы автоволновых процессов — бегущие импульсы, стоячие волны, синхронные колебания во всем пространстве, квазистохастические волны, диссипативные структуры (стационарное неоднородное распределение переменных в пространстве) [Васильев и др., 1979]. Установлены также спиральные (геликоидальные) автоволны — незатухающие низкочастотные колебания, обусловленные магнитным полем в среде распространения (магнитным полем земного ядра, если речь идет о геосреде) [Давыдов и др., 1991]. Напомним, что термин «диссипативная структура» подчеркивает термодинамический аспект проблемы — диссипативные структуры рождаются и существуют в термодинамических активных системах за счет диссипативных процессов утилизации энтропии и энергии.

Известны разнообразные источники автогенерации волн в активных средах. В частности, в неоднородных средах источником бегущих волн могут быть области, в которых собственная частота колебаний выше, нежели в окружающем их пространстве. Иначе говоря, если имеется область, собственная частота колебаний которой выше, чем в окружающем ее пространстве, то из нее будут распространяться бегущие волны. При наличии в среде нескольких таких источников среда синхронизируется самым высокочастотным из них [Васильев и др., 1979, с.638]. В итоге формируется и «выживает» наиболее устойчивая, геометрически простая конфигурация со стоячими волнами.

При рассмотрении систем с диссипацией, и в особенности возникновения флуктуаций их параметров, особая роль принадлежит знаменитой флуктуационно-диссипативной гео-

реме статистической физики, связывающей спонтанные флуктуации параметров системы с ее диссипативными свойствами [Ландау, Лившиц, 1976, 1978; Кадомцев, 1994; Ильинский, Келдыш, 1989]. Ее смысл состоит в том, что механизм любой диссипации является одновременно и механизмом рождения флуктуаций. Именно благодаря этому балансу флуктуации в диссипативной системе никогда не исчезают, а поддерживаются на уровне, диктуемом ее дискретностью.

И, наконец, остановимся еще на одном важном аспекте проблемы — учете фрактальной структуры среды [Лукк и др., 1996; Мухамедов, 1992]. Без преувеличения можно сказать, что если вещество не находится в газообразном или кристаллическом состоянии, то оно имеет в некотором диапазоне масштабов фрактальную структуру [Зосимов, Лямшев, 1995]. И хотя, на первый взгляд, фрактальные свойства, казалось бы, и не относятся к основным параметрам объектов или процессов, наличие фрактальной структуры может принципиально изменить их свойства. В частности, в качестве примера можно указать на отличие упругого поведения фрактальных сред от поведения, описываемого в рамках классической теории упругости сплошных сред, которое состоит в зависимости упругих модулей от масштаба деформации [Зосимов, Лямшев, 1995]. Другое отличие связано с их взаимодействием с электромагнитными волнами: фрактальные системы, как правило, обладают более высокими удельными излучательными параметрами, чем сплошные системы. Иначе говоря, образование фрактальных агрегатов в таких системах резко увеличивает мощность генерируемого ими излучения [Смирнов, 1993]. Другие проявления фрактальных структур в излучении связаны с флуктуациями излучения фрактальных систем [Мухамедов, 1992].

Напомним в этой связи, что излучение фрактальных моделей, с одной стороны, связано с исследованием волновых процессов во фрактальных структурах, а с другой — фрактальных структур, присущих волновым полям. В свою очередь, волновые процессы во фрактальных структурах также можно условно разделить на два типа. Это, во-первых, распространение волн во фрактальных структурах, когда фрактал — среда распространения. Во-вторых, это — рассеяние и излучение волн фрактальными структурами. Важное значение здесь имеет понятие фрактона — локализованного колебательного состояния на фракталах.

В частности, теория фрактонов способствует решению проблемы спектра колебаний и условий локализации возмущений [Зосимов, Лямшев, 1995]. Фундаментальным результатом является также то обстоятельство, что эволюция фрактальных систем описывается интегро-дифференциальными уравнениями нецелевого порядка [Нигматуллин, 1992].

Согласно приведенным представлениям и попытаемся далее рассмотреть проблему генерации и распространения электромагнитных флуктуаций литосферного происхождения, дополняя и развивая, таким образом, существующие подходы к ее решению [Шуман, 2010в,г]. Очевидно, в рассматриваемом контексте подходы, основанные на идеях нелинейной динамики, являются одними из перспективных направлений дальнейших исследований этих явлений. Сложность задач состоит, с одной стороны, в том, что необходимо учитывать возможность различного физического содержания процессов генерации электромагнитных флуктуаций на разных уровнях геометрически самоподобной блоковой системы, а с другой — наличие механизмов, трансформирующих энергию колебаний в низкочастотную и высокочастотную области спектра.

Флуктуационно-диссипативный электромагнитный шум литосферы. Как известно, модель геосреды в виде активной блочно-иерархической системы, помимо существенного приближения к реальности с точки зрения описания ее физико-механических свойств, обладает еще одним важным качеством: восходящий поток легких газов и заполненное флюидами межблочное пространство позволяют понять причины многочисленных сейсмоакустических и электромагнитных явлений, наблюдаемых при деформировании горных пород [Садовский, 2004; Гуфельд, 2007]. Изменения структуры, напряженно-деформированного состояния и механических свойств, вызванных блоковыми движениями, в свою очередь определяют вариации флюидодинамического режима, режима релаксационных процессов, тепловых и эманационных потоков из недр, условий разделения электрических зарядов и нарушения токовых систем. В геосреде оказывается возможным быстрое нарастание процессов в течение коротких промежутков времени, в свою очередь сопровождаемых возникновением контактной разности потенциалов и появлением электрических зарядов на поверхностях пор, капилляров и трещин, образованием двойных электриче-

ских слоев. В итоге, электродинамика такой самоорганизующей системы оказывается тесно связанной с ее механикой, флюидодинамикой, термодинамикой. Напомним в этой связи: если в течение некоторого промежутка времени система, содержащая электрические заряды, дипольные источники, испытывает перестройку, то в течение этой перестройки система неизбежно излучает электромагнитные волны.

Заметим, что ввиду сложности проблемы в этой области на данном этапе исследования флуктуаций нет достаточно развитых общих подходов, но есть характерные частные примеры. Один из них касается анализа флуктуаций акустической эмиссии в процессах перестройки структуры горных пород [Мухамедов, 1992]. Предполагается, что источниками сейсмоакустической эмиссии являются фронты переупаковки пород или фронты критичности. При этом критическое состояние на фронте возникает самопроизвольно при внешних энергетических воздействиях, а в качестве модели фронта самоорганизованного критического состояния предлагается использовать фронты градиентной скалярной перколяции [Гийон и др., 1991].

Один из аспектов перколяции внедрения — акустические шумы или всплески, возникающие в результате продвижения фронта внедрения по пористой среде. Физически явление можно представить себе следующим образом: внедрение флюида порождает растущий перколяционный кластер, расширение которого происходит нерегулярными скачками, связанными с заполнением трещин, карманов и пор с большим радиусом [Гийон и др., 1991; Мухамедов, 1992]. Заметим, что это — универсальный эффект, не требующий каких-либо специфических условий образования, а обусловлен только наличием диффузии флюида (реагента).

Другой аспект проблемы: с фронтом самоорганизованной критичности (градиентной перколяции) может быть связано формирование фронта волны (автоволны) тензора комплексной диэлектрической проницаемости, обусловленного появлением, раскрытием и закрытием трещин, изменением структуры порового пространства, перераспределением в нем флюидов, изменением порового давления и другими факторами. Но, как известно, если электрическая проницаемость среды, окружающей заряд, изменяется в пространстве или во времени, возникает переходное излучение (рассеяние) [Гинзбург, Цытович, 1984].

В итоге волны комплексной диэлектрической проницаемости, рассеивающиеся на отдельных зарядах, сгустках зарядов, электрических диполей и других рассеивателях, присутствующих или появляющихся в геосреде в процессе распространения фронта самоорганизованной критичности, порождают электромагнитные, а в принципе, и другие типы волн [Гинзбург, Цытович, 1984].

Заметим, что процесс излучения в нестационарной среде (переходное рассеяние) — это классическое явление, имеющее аналоги и в акустике, и в механике. Однако для низкочастотных волн диэлектрической проницаемости рассеивания возможно только в том случае, если их частота лежит в области прозрачности среды для электромагнитных волн соответствующей частоты [Гинзбург, Цытович, 1984]. Но, как известно, в неоднородной среде нет бегущих (распространяющихся) волн — волны являются стоячими [Раутиан, 2008]. Далее, как уже отмечалось, колебательная неустойчивость приводит к образованию стоячих волн [Васильев и др., 1979], что, вообще говоря, меняет существо дела: флуктуационно-диссипативная теорема связывает спонтанные флуктуации параметров системы с ее диссипативными свойствами, в частности спектральную плотность флуктуаций сторонних токов с антиэрмитовой частью тензора диэлектрической проницаемости вещества:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon'_{ij} + i\varepsilon''_{ij}$$

[Ильинский, Келдыш, 1989].

Важную роль в генерации таких связанных акустоэлектромагнитных возмущений играет такое фундаментальное свойство геосреды, как нелинейность. Многообразии причин нелинейности можно свести к двум типам. В первом из них нелинейность является «врожденной», т.е. является следствием внутренних причин. Во втором случае нелинейность является «привнесенной». К этому типу обычно относят системы со значительным энерговыделением или энергонасыщением, высокотемпературные процессы, волны со значительной амплитудой. При этом нелинейность может быть или распределена в объеме среды, или сосредоточена в ее ограниченной области. Существенное обстоятельство — весьма сильное (на 2 — 4 порядка!) возрастание акустической нелинейности, обусловленное наличием в структуре среды компонент с резко контрастирующими свойствами. Характерный пример таких «контрастно-мягких» дефектов — это

трещины. Ясно, что описание таких сред, в том числе генерации и распространения эмиссий, требует привлечения новых физических и математических моделей с учетом накопленной средой энергии, связей между сейсмоакустическим и электромагнитным полями, между энергетическими параметрами химического потенциала геосреды и ее флюидонасыщенностью [Гуфельд, Матвеева, 2001; Дмитриевский, Володин, 2006; Гуфельд, 2007; Геншафт, 2009].

К новому видению проблемы генерации и распространения электромагнитных флуктуаций привело и появление нового направления в электромагнитной теории — фрактальной электродинамики материальных сред, объединяющей фрактальную геометрию и электромагнетизм [Болотов, 2002; Боголюбов и др., 2009; Потапов, 2009; Тарасов, 2011]. Ее предмет составляет изучение электромагнитных процессов в пространстве, заполненном веществом с фрактальной структурой. К фрактальным структурам обычно относят фрактальные кластеры, фрактальные поверхности, перколяционные кластеры и другие образования, наблюдаемые в эксперименте [Болотов, 2002].

Трудности электродинамического описания фрактальных сред обусловлены зависимостью их макроскопических электромагнитных параметров — диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостей и проводимости σ — от рассматриваемого объема, что делает невозможным применение стандартной модели сплошной среды, в которой они определяются однозначно для физически бесконечно малых объемов. В итоге ключевым элементом здесь является процедура усреднения, построение которой оказывается возможной с использованием фрактальных и мультифрактальных мер [Болотов, 2002; Боголюбов и др., 2009]. Заметим далее, что последовательное определение диэлектрической и магнитной проницаемостей подразумевает однозначное разбиение индуцируемого в среде тока на части, одна из которых ответственна за электрическую поляризацию, а другая — за намагничивание [Бредов и др., 1985]. Но в геосреде, как правило, присутствуют флуктуации материальных свойств различных масштабов. В итоге ток в некоторой точке среды, вообще говоря, может давать вклад в электрическую поляризацию на одном масштабе усреднения и в намагниченность на другом [Виноградов, 2002]. В этом смысле вопрос о многообразии материальных уравнений для сред с фрактальной структурой в некотором диапазоне масштабов известной

степени остается открытым. Не известны и сколь-нибудь продвинутые статистические характеристики фрактальных структур, хотя для реальных сред самоподобие и следует понимать в статистическом смысле — статистические характеристики расположения элементов одного масштаба во фрагменте большего масштаба не зависят от абсолютных значений, а определяются только их отношением.

В настоящее время существует несколько направлений в развитии аппарата электродинамики фрактальных сред. Все они основаны на фрактальных (канторовых) мерах [Болотов, 2002; Боголюбов и др., 2009]. Как уже упоминалось, фундаментальным результатом здесь является тот факт, что электромагнитные поля во фрактальных средах в общем случае демонстрируют дробно-степенную релаксацию.

В рассматриваемом контексте изучения механизмов генерации и распространения электромагнитных возмущений в геосреде интерес представляет переходное фрактальное рассеяние, связанное с фрактальностью электродинамических структур [Болотов, 1998; 2002]. Так, в работе [Болотов, 2002] вместо обычно анализируемого изменения диэлектрической проницаемости по гармоническому закону [Гинзбург, Цытович, 1984]

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_1 \cos(\mathbf{k}_0 \mathbf{r} - \omega_0 t)$$

рассмотрена задача переходного рассеивания всплеска диэлектрической проницаемости вида на покоящемся заряде:

$$\epsilon(\mathbf{r}, t) = \epsilon_0 + \epsilon_1 \gamma_\xi(\mathbf{k}_0 \mathbf{r} - \omega_0 t),$$

где ϵ_0 — невозмущенная диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится заряд; ϵ_1 — изменение ϵ , обусловленное прохождением волнового фронта; ω_0 и \mathbf{k}_0 — частота и волновой вектор волны; γ_ξ — функция диссипативного всплеска, основная особенность которой — связь ее фурье-представления со множеством Кантора.

Функция Кантора — это ограниченная сверху и снизу монотонная неубывающая функция, постоянная на удаленных из отрезка $[0, 1]$ интервалах и меняющаяся скачком в точках канторова дисконтинуума («чертова лестница») [Болотов, 1998; 2002]. Важно, что такой достаточно сложный вид всплеска диэлектрической проницаемости может формироваться, например, ударными волнами, распространяющимся фронтом концентрации флюидной фазы и др. Установлено, что диссипативный всплеск диэлектрической проницае-

мости рассматриваемого типа при рассеянии на покоящемся заряде формирует широкодиапазонный фрактальный спектр электромагнитного излучения, частоты которого сосредоточены в точках множества Кантора [Болотов, 2002]. Сама же структура спектра колебаний определяется масштабами, ограничивающими диапазон проявления фрактальных свойств среды и значением спектральной размерности.

Следует заметить, что распространяющийся фрактальный фронт всплеска диэлектрической проницаемости рассматриваемого типа является недифференцируемым и, вообще говоря, не имеет нормали. По этой причине становятся проблематичными или исключаются вообще такие привычные понятия, как «лучевая траектория» или «лучевая оптика». Тем не менее переходное фрактальное рассеяние является, очевидно, одним из источников широкополосного электромагнитного излучения, регистрируемого на земной поверхности, которое может быть использовано для диагностики хаотической динамики геосреды, ее структуры, решения других актуальных задач геологии и геофизики. Видно также, что идеи перколяции и фрактальной геометрии имеют широкий спектр областей применения, отнюдь не сводящихся к вряд ли прямо применимой ситуации стандартной фрактальной геометрии [Гийон и др., 1991].

Правомерна постановка следующего вопроса: имеются ли прямые экспериментальные свидетельства в пользу обоснования предложенной И. Л. Гуфельдом концепции динамически неустойчивой геосреды? Очевидно, ответ должен быть положителен, хотя, разумеется, в проблеме планетарной дегазации Земли следует различать ряд существенных обстоятельств, отличающих поведение горных пород в естественном залегании от лабораторных экспериментов на их образцах [Гуфельд, 2007; Гуфельд, Матвеева, 2011].

Как свидетельствует лабораторный эксперимент, при имплантации легких газов в горные породы в них происходят структурные перестройки и аморфизация структуры, формируется газовая пористость, изменяются физико-механические свойства [Гуфельд, Матвеева, 2011]. Они оказываются весьма чувствительными к парциальному давлению легких газов в окружающем пространстве и к распределению их в кристаллической структуре и газовых порах. Общим следствием имплантации легких газов является формирование внутреннего напряженного состояния,

проявляющегося в эффектах ползучести и изменении объема [Гуфельд, 2007].

Следует упомянуть также результаты исследований по генерации акустической эмиссии при разрушении насыщенного водородом металлического образца, выполненные G. Gannelli, R. Cantelli, A. Corsero (Phys. Rev. Lett. 70. 3923, 1993), приведенные в обзоре [Зосимов, Лямшев, 1995]. Насыщение образца водородом осуществлялось при высокой температуре, а его разрушение (образование микротрещин) происходило в результате охлаждения. В частности, установлено распределение амплитуд импульсов акустической эмиссии вида $N=A^{-0,9}$, причем такая зависимость выполнялась на интервале значений амплитуд более чем в два порядка.

Заметим, что как в лабораторных, так и в натуральных экспериментах по регистрации электромагнитной эмиссии обычно ограничиваются измерением числа импульсов в единицу времени (обычно 1 с). Такой способ измерений имеет определенные преимущества по сравнению с измерением интенсивности сигнала (его огибающей), поскольку он чувствителен к изменению количества излучателей в среде. Но при регистрации интегральной интенсивности потока импульсов не удастся идентифицировать реальный вид высокочастотного сигнала, что затрудняет изучение механизма его генерации и расположения источников в среде. Отсутствует также анализ фрактальных параметров системы, информация об ее архитектуре и принципах межсистемных взаимодействий, что существенно снижает эффективность ее диагностики и затрудняет понимание протекающих в ней процессов.

О взаимодействии свободных зарядов геосреды с электромагнитным полем. В свете упомянутых представлений о геосреде как своеобразной электродинамической системе, механизмах генерации и распространения в ней электромагнитных возмущений, представляется уместным рассмотреть более подробно особенности взаимодействия присутствующих в геосреде зарядов с электромагнитным полем.

Как известно, задача о взаимодействии электромагнитного поля с веществом должна быть самосогласованной, т. е. учитывать воздействие поля на вещество, и наоборот, вещества на поле. Последнее обстоятельство в классической электродинамической теории обычно учитывается путем введения материальных констант — диэлектрической и магнитной проницаемости, показателя преломления,

линейной восприимчивости. Эти константы (или тензоры), вводимые феноменологически, и позволяют решать задачи о распространении электромагнитного поля в материальной среде [Бредов и др., 1985].

В том случае, если представляется целесообразным разделить наведенные в среде токи на ток свободных носителей, ток поляризации связанных зарядов и вихревой ток намагничивания, удобно ввести векторы электрической индукции $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + 4\pi\mathbf{P}(\mathbf{r}, t)$ и напряженности магнитного поля $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) - 4\pi\mathbf{M}(\mathbf{r}, t)$. При этом в поляризации среды $\mathbf{P}(\mathbf{r}, t)$ можно учесть вклад токов свободных и связанных носителей или только вклад тока связанных носителей, выделяя ток свободных носителей заряда. Тогда вектор намагниченности будет определять вихревые токи, а система уравнений Максвелла в среде может быть записана в форме [Бредов и др., 1985]

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}, \quad \operatorname{div} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0, \\ \operatorname{rot} \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) &= \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{J}_{\text{ext}}(\mathbf{r}, t), \\ \operatorname{div} \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) &= 4\pi\rho_{\text{ext}}(\mathbf{r}, t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{J}_{\text{ext}}(\mathbf{r}, t)$ — сторонние токи, которые могут быть обусловлены и неэлектромагнитными явлениями. Индуцированные токи и заряды в общем случае являются функционалами напряженностей полей, которые, в свою очередь, определяются суммой индуцированных и сторонних токов и зарядов. Используя далее разложение Фурье и считая, что все интегралы и производные полей в уравнениях Максвелла понимаются в смысле сходимости по вероятности или в среднем квадратичном:

$$\mathbf{A}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d\omega}{2\pi} A(\omega) \exp(-i\omega t),$$

где $\mathbf{A} = \mathbf{E}, \mathbf{H}, \mathbf{D}, \mathbf{B}, \mathbf{J}, \rho$, система (1) для спектральных амплитуд примет вид

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) &= \frac{i\omega}{c} \mathbf{B}(\mathbf{r}, \omega), \quad \operatorname{div} \mathbf{B}(\mathbf{r}, \omega) = 0, \\ \operatorname{rot} \mathbf{H}(\mathbf{r}, \omega) &= -\frac{i\omega}{c} \mathbf{D}(\mathbf{r}, \omega) - \frac{4\pi}{c} \mathbf{J}_{\text{ext}}(\mathbf{r}, \omega), \\ \operatorname{div} \mathbf{D}(\mathbf{r}, \omega) &= 4\pi\rho_{\text{ext}}(\mathbf{r}, \omega). \end{aligned} \quad (2)$$

Как известно, уравнение движения электрона (или иной заряженной частицы) в электромагнитном поле имеет вид

$$\frac{dp}{dt} = e\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \frac{e}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t)], \quad (3)$$

где p — импульс электрона.

Для скоростей $v \ll c$ имеем

$$\begin{aligned} \mathbf{p} &= m\mathbf{v}, \quad v = \frac{d\mathbf{r}}{dt}, \\ m \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} &= e\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \frac{e}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t)]. \end{aligned} \quad (4)$$

Следуя работе [Ильинский, Келдыш, 1989], проанализируем поведение свободного заряда в поле стоячей волны, положив

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r}) \cos \omega t, \quad \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}(\mathbf{r}) \sin \omega t. \quad (5)$$

Ограничиваясь в уравнении (4) только членами первого порядка по v/c , когда силой Лоренца можно пренебречь и не учитывать зависимость электрического поля от координаты электрона \mathbf{r} , после усреднения приходим к уравнению [Ильинский, Келдыш, 1989]

$$m \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = -\frac{e^2}{4\pi\omega^2} \nabla E^2(\mathbf{r}),$$

из которого следует, что на электроны в среднем действует сила, выталкивающая их из области максимальных значений поля, что ведет к их локализации в областях узлов электрического поля.

В случае движения электрона в поле бегущей волны

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= E \cos(\omega t - kz) \mathbf{e}_x, \\ \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) &= H \cos(\omega t - kz) \mathbf{e}_y, \end{aligned}$$

где $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y$ — единичные векторы поляризации вдоль осей x, y , уравнение движения электрона (4) в координатной форме примет вид [Ильинский, Келдыш, 1989]

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= eE \left(1 - \frac{v_z}{c} \right) \cos(\omega t - kz), \\ m\ddot{y} &= 0, \\ m\ddot{z} &= \frac{ev_x}{c} E \cos(\omega t - kz). \end{aligned} \quad (6)$$

В нулевом приближении ускорение электрона направлено по оси v/c . Электрон при этом совершает колебание вдоль оси x и излучает с интенсивностью

$$\varepsilon = \frac{1}{3c^3} \left| \frac{e^2 \mathbf{E}}{m} \right|^2.$$

В следующем порядке по v/c с учетом силы Лоренца в уравнении движения по оси z

$$m\ddot{z} = \frac{e^2 E^2}{m\omega c} \cos \omega t \sin \omega t = \frac{e^2 E^2}{2m\omega c} \sin 2\omega t.$$

Следовательно, в первом приближении по v/c электрон колеблется вдоль оси z с удвоенной частотой 2ω . В целом же, с учетом колебаний по оси x , он описывает восьмерку в плоскости xz .

Ситуация существенно меняется при наличии подмагничивающего поля \mathbf{H}_0 . В этом случае, считая электроны в среде свободными и пренебрегая ее магнитными свойствами, уравнение движения для электронов (4) может быть записано в виде

$$m\ddot{\mathbf{r}} = e\mathbf{E} + \frac{e}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{H}_0, \quad (7)$$

где \mathbf{E} — электрическое поле электромагнитной волны, а \mathbf{H}_0 — постоянное и однородное подмагничивающее поле (поле земного ядра). Полагая далее, что волновой вектор поля параллелен вектору \mathbf{H}_0 , проецируя уравнение движения на оси координат и решая эти уравнения, приходим к следующему выражению для диэлектрической проницаемости среды распространения [Бредов и др., 1985, с. 338]:

$$\varepsilon_{\pm} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega_{\mp} \omega_c)}, \quad (8)$$

где $\omega_p = \sqrt{4\pi n e^2 / m}$ — плазменная частота, n — концентрация электронов, $\omega_c = eH_0 / mc$ — циклотронная частота.

Из уравнения (8) следует, что при условии $\omega < \omega_c$ $\varepsilon_{+} > 1$ и является действительной величиной. В этом случае в среде может распространяться волна с соответствующей циркулярной поляризацией. Ясно, что такая волна является в этом частотном диапазоне слабозатухающей. Это означает, что бесстолкновительное затухание сильно подавлено, так как магнитное поле \mathbf{H}_0 , искривляя траекторию движения электронов, препятствует их длительному нахождению в фазе с волной. Такие слабозатухающие относительно низкочастотные колебания, всецело обусловленные наличием подмагничивающего поля \mathbf{H}_0 в среде распространения, получили название геликоидальных (спиральных) электромагнитных волн. Эти соображения представляются важным также с точки зрения возможности формирования и распространения в геосреде геликоидальных автоволн.

Как уже отмечалось, возможность их распространения на расстояния, значительно превосходящие мощность скин-слоя, с точки зрения теории и нормальных волн связано с двумя факторами — наличием в среде распространения немоной зависимости фазовой скорости с глубиной и возможностью раскрытия промежуточного «дисперсионного» окна [Шуман, Богданов, 2008]. Его появление — экспериментальный факт.

Заключение. Исследование геомагнитных флуктуаций стало важным элементом современной фундаментальной и прикладной геофизической науки. В частности, можно указать на принципиальную возможность использования регистрируемых на земной поверхности геомагнитных пульсаций для гидромагнитной диагностики (определения свойств магнитосферной и ионосферной плазмы), геофизической разведки (методы магнитотеллурического и магнитовариационного зондирования и профилирования). Многолетний опыт изучения естественного электромагнитного излучения позволил приступить к решению проблемы поиска аномальных возмущений и флуктуаций, связанных с сейсмической активностью, проведению исследований физических процессов, сопровождающих подготовку сейсмических событий на различных фазах.

Существенно, что процессы и механизмы генерации и распространения электромагнитных возмущений весьма разнообразны. Очевидно, реально в природе работает совокупность ряда физических механизмов. Неудивительно, что в столь сложной ситуации весьма проблематично представить себе и модель геосреды, одинаково пригодную «на все случаи жизни». Однако вошло в норму и стало уже традицией рассматривать литосферу в качестве пассивного континуума. И такой подход вполне оправдан во многих случаях, но далеко не всегда. В частности, он эффективен при анализе возмущений, источники которых находятся над земной поверхностью. Он вполне приемлем также при изучении части электромагнитных возмущений литосферного происхождения. При этом достаточно сильное частотно-зависимое поглощение электромагнитного излучения в проводящих слоях земной коры ориентирует эксперимент на активное использование двух возможных диапазонов наблюдений:

ОНЧ (VLF) — излучений с частотами от сотен Гц до первых МГц, источники которого, как предполагают, находятся в верхних приповерхностных слоях земной коры;

СНЧ (ULF) — возмущений с частотами от 10 Гц до 30 кГц, источники которых, в принципе, могут располагаться на значительно большей глубине, включая и области очагов возможных сейсмических событий.

Но, как достаточно убедительно свидетельствует обширный полевой эксперимент последних лет, такая трактовка не является исчерпывающей. Существует и другая компонента геомагнитных флуктуаций литосферного происхождения, которая не поддается адекватной трактовке в рамках классических представлений. Имеются весомые основания назвать ее флуктуационно-диссипативным электромагнитным шумом литосферного происхождения. Его существование всецело обусловлено и ассоциируется с представлениями о геосреде как активной открытой неравновесной системе со множеством самоорганизующихся структур, в которой идут необратимые диссипативные процессы. Эта компонента излучений может рассматриваться в качестве нелинейного отклика геосреды на относительно малые изменения ее параметров и внешние воздействия. В настоящее время известны разнообразные источники автогенерации волн в активных средах. Для описания и понимания свойств и механизмов генерации и распространения этого типа электромагнитного шума как естественно-физического явления, не требующего специальных условий возникновения, определяющее значение имеет флуктуационно-диссипативная теорема статистической физики, связывающая спонтанные флуктуации системы с ее диссипативными свойствами. Именно за счет этого баланса флуктуации в системе никогда не исчезают и поддерживаются на уровне, определяемой ее дискретностью. Далее, если в такой среде имеется пространственная область, собственная частота колебаний которой выше, чем в окружающей среде, то из нее неизбежно будут распространяться в том числе и электромагнитные волны, а в случае нескольких таких источников среда синхронизируется самым высокочастотным из них.

Фракталы способствуют пересмотру взгляда на геометрические свойства объектов в геосреде, а динамический хаос вносит существенные изменения в понимание того, как эти объекты могут вести себя во времени. Нетипичные нелинейные явления в таких структурно-неоднородных средах — это доминантные частоты и механизмы, переносящие энергию колебаний в низкочастотную или высокочастотную области спектра. При этом

достаточно располагать источником энергии, чтобы самовозбуждение флуктуаций стало возможным. Существенно, что образование фрактальных агрегатов в таких системах резко увеличивает мощность создаваемого в них излучения.

Как известно, модель фронта градиентной перколяции позволяет дать физическую интерпретацию наблюдаемых параметров сейсмоакустического шума как неравновесного самоорганизованного критического явления. Очевидно, ассоциируемый с этим фронтом диссипативный всплеск диэлектрической проницаемости при рассеивании на покоящихся или движущихся зарядах, сгустках зарядов или диполях, содержащихся или появляющихся при этом в геосреде, в свою очередь формирует широкодиапазонный фрактальный спектр электромагнитного излучения. Существенно, что этот распространяющийся фрактальный фронт (всплеск) диэлектрической проницаемости недифференцируем и, вообще говоря, не имеет нормали. По этой причине становятся проблематичными такие понятия, как «лучевая траектория» или «лучевая оптика». Заметим также, что в случае реальных фрактальных сред (в частности, геосреде) имеется обычно некий максимальный масштаб, ограничивающий область их фрактального поведения. При этом на масштабах, превышающих его, и, следовательно, на низких частотах имеют место обычные закономерности распространения, в том числе и обычный спектр излучений. Таким образом, фрактальные модели позволяют продвинуться в исследовании объектов и явлений, ранее не поддающихся пониманию. Однако в арсенале современных экспериментальных методов обычно отсутствует анализ фрактальных параметров объектов, что сильно снижает информацию о них. Одна из актуальных задач — привлечь внимание специалистов к этой стороне проблемы.

Подчеркнем еще раз: сейсмоакустический и электромагнитный шум литосферного происхождения — это универсальный эффект, не требующий каких-либо специальных условий образования фрактальных объектов. Он обусловлен наличием диффузии. Отчетливо видны и трудности его аналитического описания. Очевидно, это отсутствие понимания архитектуры геосреды в рассматриваемой конкретной области исследований и принципов межсистемных и межблочных взаимодействий.

И, наконец, возвращаясь к эпиграфу, заметим, что ключевой его элемент — это слово-

сочетание «скорее всего». Очевидно, безоговорочно принимая подобную точку зрения, весьма затруднительно выйти за рамки задач, имеющих, на первый взгляд, простые решения. Ясно, что при истолковании всей совокупности сигналов, регистрируемых на земной поверхности, мы никогда не можем быть уверенными в том, что не пренебрегли чем-то весьма существенным: они могут быть обусловлены как внутренними свойствами системы, так и внеш-

ними факторами, в том числе рождаться универсальными путями, независимо от природы системы. Их мир поистине разнообразен и удивителен, а разработанные методы их анализа позволяют получать информацию о строении геосреды и в отдельных случаях предсказывать ее дальнейшую эволюцию. Неудивительно, что данное направление исследований приобретает в геофизических исследованиях все большую популярность.

Список литературы

- Богданов Ю. А., Воронин В. И., Уваров В. Н. Электромагнитное проявление структуры недр // Геофиз. журн. — 2003. — 25, № 4. — С. 117—124.
- Богданов Ю. А., Коболов В. П., Русаков О. М., Захаров И. Г. Геополаритонное зондирование газоносных структур северо-западного шельфа Черного моря // Геология и полезные ископаемые мирового океана. — 2007. — 22, № 4. — С. 37—61.
- Богданов Ю. А., Павлович В. Н., Шуман В. Н. Спонтанная электромагнитная эмиссия литосферы: состояние проблемы и математические модели // Геофиз. журн. — 2009а. — 31, № 4. — С. 20—33.
- Богданов Ю. А., Бондаренко Н. В., Захаров И. Г., Лойко Н. П., Лукин В. В., Черняков А. М., Чертов О. Р. Аппаратурно-методическое обеспечение метода анализа спонтанной электромагнитной эмиссии Земли // Геофиз. журн. — 2009б. — 31, № 4. — С. 34—43.
- Боголюбов А. Н., Потапов А. А., Рехвиашвили С. М. Способ введения дробного интегро-дифференцирования в классической электродинамике // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика и астрономия. — 2009. — № 4. — С. 9—15.
- Болотов В. Н. Обобщенная функция Кантора и переходное фрактальное рассеяние // Журнал техн. физики. — 2002. — 72, вып. 2. — С. 8—15.
- Болотов В. Н. Переходное фрактальное излучение // Электромагнитные явления. — 1998. — 1, № 1. — С. 74—77.
- Бредов М. М., Румянцев В. В., Топтыгин И. Н. Классическая электродинамика: Учебное пособие / Под ред. И. Н. Топтыгина. — Москва: Наука, 1985. — 400 с.
- Васильев А. Н., Романовский Ю. М., Яхно В. Г. Автоволновые процессы в распределенных кинетических системах // Успехи физ. наук. — 1979. — 128, вып. 4. — С. 625—666.
- Виноградов А. П. К вопросу о форме материальных уравнений в электродинамике // Успехи физ. наук. — 2002. — 172, № 3. — С. 363—370.
- Вол А., Гилат А. (Л.) Первичные водород и гелий как источники энергии землетрясений. Генезис углеводородных флюидов и месторождений / Отв. ред. А. Дмитриевский, Б. Валяев. — Москва: ГЕОС, 2006. — С. 160—166.
- 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.
- Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Аронов Б. Л. О высокочастотном электромагнитном излучении при сейсмической активности // Докл. АН СССР. — 1979. — 248, № 5. — С. 1077—1081.
- Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Похотелов О. А. Сейсмозлектромагнитные явления. — Москва: Наука, 1988. — 174 с.
- Гохберг М. Б., Гуфельд И. Л., Гершензон Н. И., Пилипенко В. А. Электромагнитные эффекты при разрушении земной коры // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1985. — № 1. — С. 72—87.
- Гульельми А. В. Ультранизкочастотные волны в коре и в магнитосфере Земли // Успехи физ. наук. — 2007. — 177, № 12. — С. 1257—1276.
- 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.
- Давыдов В. А., Зыков В. С., Михайлов А. С. Кинематика автоволновых структур в возбудимых средах // Успехи физ. наук. — 1991. — 161, № 8. — С. 45—86.

- Даниленко В. А. К теории движения блочно-иерархических геофизических сред // Докл. АН Украины. — 1992. — № 2. — С. 87—90.
- Дмитриевский А. Н., Вологин И. А. Формирование и динамика энергоактивных зон в геологической среде // Докл. РАН. — 2006. — **411**, № 3. — С. 395—399.
- Дубровский В. А., Сергеев В. Н. Кратко- и среднесрочные предвестники землетрясений как проявление неустойчивости скольжения вдоль разломов // Физика Земли. — 2006. — № 10. — С. 11—18.
- Ершов С. В., Новик О. Б. Сейсмо-гидро-электромагнетизм — физика предвестников цунами // Геофизика 21-го столетия: 2007 г. Сб. трудов девятих геофизических чтений им. В. В. Федынского (1—3 марта 2007 г., Москва). — Тверь: ООО «Изд-во ГЕРС», 2008. — С. 65—75.
- Ершов С. В., Новик О. Б., Ружин Ю. А. Электромагнитные сигналы деформационных процессов под дном океана. <http://www.mivgu.ru/conf/murom2010/section4/23>.
- Зосимов В. В., Лямшев Л. М. Фракталы в волновых процессах // Успехи физ. наук. — 1995. — **165**, № 4. — С. 362—402.
- Ильинский Ю. А., Келдыш Л. В. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом. — Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1989 — 304 с.
- Кагомцев Б. Б. Динамика и информация // Успехи физ. наук. — 1994. — **164**, № 5. — С. 449—530.
- Каменецкий Ф. М. Высокорастворимая электро-разведка: факт или реклама // Геофизика. — 1999. — № 1. — С. 41—44.
- Кисин И. Г. Явление самоорганизации при взаимодействии флюидных потоков и геодинамических процессов в земной коре // Геофизика XXI столетия: 2007 г. Сб. трудов девятих геофизических чтений им. В. В. Федынского (1—3 марта 2007 г., Москва). — Тверь: ООО «Изд-во ГЕРС», 2008. — С. 82—88.
- Коболев В. П. Дослідно-методична комплексна геолого-геофізична експедиція 66-го рейсу НДС «Професор Водяницький» в західній частині Чорного моря // Геолог України. — 2011. — № 1. — С. 40—62.
- Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. — Москва: Наука. — Ч. 1. — 1976; Ч. 2. — 1978.
- Ларина В. И., Мигулин В. В., Сергеева Н. Г., Сеннин Б. В. Исследование динамики литосферы по спутниковым измерениям электромагнитного излучения. <http://www.mstu.edu.ru//publish/> (Вестн. МГТУ. — 2001. — **4**, вып. 1).
- Левшенко В. Т. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы литосферного происхождения: Автореф. дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. — Москва: ОНФЗ РАН, 1995 — 36 с.
- Липеровский В. А. Физические модели связи в системе литосфера — атмосфера — ионосфера. Лекции БШФФ. — Москва: Институт физики Земли РАН, 2006. — С. 58—65.
- Лука 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.
- Мухамедов В. А. О фрактальных свойствах высокочастотного сейсмического шума и механизмах его генерации // Физика Земли. — 1992. — № 3. — С. 39—49.
- Нигматуллин Р. Р. Дробный интеграл и его физическая интерпретация. // Теоретическая и математическая физика. — 1992. — **90**, № 3. — С. 354—368.
- Паламарчук В. К., Кирейтов В. Р. Проблемы информационного обеспечения и построения системы ближнего прогноза землетрясений. — Новосибирск: Международный институт нелинейных исследований. Сибирское отделение. // WebGround01.06.2010.Наука:mhtml:file://E:\WebGround%2001_06_2010%20Наука%Физика%20(Ретроспекция...01.11.2010).
- Потапов А. А. Современное состояние радиофизических применений фракталов, дробных операторов и скейлинга // Сб. докл. III Всерос. конф. «Радиолокация и радиосвязь». ИРЭ РАН (26—30 октября 2009 г., Москва) — Москва: ИРЭ РАН, 2009. — С. 842—876.
- Раутиан С. Г. Об отражении и преломлении на границе среды с отрицательной групповой скоростью // Успехи физ. наук. — 2008. — **178**, № 10. — С. 1017—1024.
- Саговский М. А. Геофизика и физика взрыва. Избр. тр. / Отв. ред. В. В. Адушкин. — Москва: Наука, 2004. — 440 с.
- Смирнов Б. М. Излучательные процессы с участием фрактальных структур // Успехи физ. наук. — 1993. — **163**, № 7. — С. 50—63.
- Старостенко В. И., Даниленко В. А., Венгрович Д. Б., Кутас Р. И., Стифенсон Р. А., Столба С. Н. Моделирование эволюции осадочных бассейнов с учетом структуры природной среды и процессов самоорганизации // Физика Земли. — 2001. — № 12. — С. 40—51.
- Старостенко В. И., Лукин А. Е., Коболев В. П., Русаков О. М., Орлюк М. И., Шуман В. Н., Омель-

- ченко В. Д., Пашкевич И. К., Толкунов А. П., Богданов Ю. А., Буркинский И. Б., Лойко Н. П., Федотова И. Н., Захаров И. Г., Черняков А. М., Курприенко П. Я., Макаренко И. Б., Легостаева О. В., Лебедь Т. В., Савченко А. С. Модель глубинного строения Донецкого складчатого сооружения и прилегающих структур по данным региональных геофизических наблюдений // Геофиз. журн. — 2009. — **31**, № 4. — С. 44—68.
- Стаховский И. Р. 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. инж.-физ. ин-та, 2000. — 235 с.
- Тарасов В. Е. Модели теоретической физики с интегродифференцированием дробного порядка. — Москва: РХД, 2011. — 568 с.
- Шуман В. Н. Концепция динамически неустойчивой геосреды и сейсмoeлектромагнитный шум литосферы // Геофиз. журн. — 2010в. — **32**, № 6. — С. 101—118.
- Шуман В. Н. Магнитотеллурический импеданс: фундаментальные модели и возможности их обобщения // Геофиз. журн. — 2010б. — **32**, № 3. — С. 18—28.
- Шуман В. Н. Система локальных векторных тождеств импедансного типа для гармонического электромагнитного поля на замкнутой регулярной границе раздела и задачи геоэлектрики // Геофиз. журн. — 2008. — **30**, № 3. — С. 3—13.
- Шуман В. Н. Электродинамика геосреды и методы геоэлектрики // Геофиз. журн. — 2010а. — **32**, № 2. — С. 28—42.
- Шуман В. Н. Электромагнитная эмиссия литосферы: новые экспериментальные результаты и анализ проблемы // Геоинформатика. — 2010г. — № 4. — С. 79—93.
- Шуман В. Н. Электромагнитные зондирования геологической среды: проблемы и парадоксы // Геоинформатика, 2003. — № 4. — С. 30—42.
- Шуман В. Н. Электромагнитные сигналы литосферного происхождения в современных наземных и дистанционных зондирующих системах // Геофиз. журн. — 2007. — **29**, № 2. — С. 3—16.
- Шуман В. Н., Богданов Ю. А. Электромагнитная эмиссия литосферы: пространственная структура и возможные механизмы генерации // Геофиз. журн. — 2008. — **30**, № 6. — С. 39—50.
- Шуман В. Н., Причепий Т. И. Оптимальные режимы электромагнитных зондирующих систем с контролируемым возбуждением поля в изотропных средах с дисперсией. // Геофиз. журн. — 2004. — **26**, № 4. — С. 55—62.
- Шуман В. Н., Коболев В. П., Богданов Ю. А., Захаров И. Г., Яцюта Д. А. Спонтанное электромагнитное излучение на акваториях: новый эксперимент и приложения // Геофиз. журн. — 2011. — **33**, № 4. — С. 33—49.
- Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes* / Ed. M. Hayakawa. — Tokyo: Terra Scientific Publishing Company. — 1999. — 996 p.
- Gershenson N., Vambakidis G. Modeling of seismoelectromagnetic phenomena* // Rus. J. Earth Science. — 2001. — **3**, № 4. — P. 247—275.