

Метод анализа спонтанной электромагнитной эмиссии Земли: физические предпосылки, элементы теории, полевой эксперимент

© В. Н. Шуман¹, В. П. Коболев¹, В. И. Старостенко¹, И. Б. Буркинский²,
Н. П. Лойко², И. Г. Захаров², Д. А. Яцута¹, 2012

¹ Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

² ООО «Юг-нефтегазгеология», Киев, Украина

Поступила 10 мая 2012 г.

Представлено членом редколлегии И. Н. Корчагиным

Проаналізовано існуючі і нові підходи до аналізу спонтанної електромагнітної емісії, генерованої літосферою в широкому діапазоні частот. Розгляд проблемних і дискусійних питань її генерації й поширення, також деяких результатів польових експериментів дозволив підкреслити спільність і різницю методів природного імпульсного електромагнітного поля Землі та аналізу спонтанної електромагнітної емісії Землі, намітити контури і перспективи їх практичного використання.

Existing and new approaches to the analysis of spontaneous electromagnetic emission generated by the lithosphere in the wide frequency range outlined lately have been analyzed in the article. Considerations of a set of problems and controversial topics of its generation and propagation and some results of field experiments permitted to accentuate the commonness and differences of methods of natural impulse electromagnetic field of the Earth measurements and analysis of spontaneous electromagnetic emission of the Earth, to outline the contours and perspectives of their practical application.

Введение. Цель настоящей публикации — дать систематическое и по возможности простое описание новой технологии геоэлектрической разведки — метода анализа спонтанной электромагнитной эмиссии Земли (АСЭМЭЗ), источники которой расположены в земной коре. Актуальность разработки метода определяется тем обстоятельством, что изучение электромагнитных сигналов литосферного происхождения открывает относительно новый и перспективный канал получения информации о строении и физических процессах литосферы. Как известно, в последние годы этой проблеме посвящена довольно обширная литература, в которой отражены многие ее ключевые аспекты (см., например, публикации [Сурков, 2000; Гульельми, 2007; Шуман, 2012а, б] и цитируемые в них работы).

Напомним также, что метод естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ), близкий или тождественный методу АСЭМЭЗ по типу и диапазону регистрируемого сигнала, берет свое начало с классических работ А. А. Воробьева [Воро-

бьев, 1970; 1980]. В статье проанализированы существующие и наметившиеся в последнее время новые подходы к анализу спонтанной по классификации В. Т. Левшенко [Левшенко, 1995] электромагнитной эмиссии, генерируемой литосферой в широком диапазоне частот. Рассмотрение ряда проблемных и дискуссионных вопросов ее генерации и распространения и результатов ключевых полевых и лабораторных экспериментов позволило подчеркнуть общность и различие методов ЕИЭМПЗ и АСЭМЭЗ, наметить контуры и перспективы их практического использования. Сложность и многоаспектность проблемы состоит в том, что пока не удастся отразить имеющийся эмпирический материал на одинаково разделяемой всеми специалистами аксиоматике. Не существует и модели геосреды, одинаково пригодной для описания всего спектра и разнообразия регистрируемых на земной поверхности излучений.

Обычно предполагается, что среда — пассивный континуум и при описании спонтанной электромагнитной эмиссии к ней приме-

ним аппарат классической электродинамики сплошных сред. Однако само наличие акусто-сейсмоэлектромагнитной эмиссии свидетельствует о том, что геосреда является открытой неравновесной динамической системой с множеством самоорганизующихся структур. И для ее описания, строго говоря, необходима несколько иная, модифицированная электродинамическая основа [Шуман, 2010а; 2011; 2012а, б]. При этом фракталы, дробные операторы и скейлинг являются полезными инструментами, адаптированными к запросам геоэлектрической практики, но проблема материальных уравнений электродинамики может оказаться весьма сложной.

Мы полагаем, что результаты выполненных в последние годы полевых работ как на суше, так и на акваториях по регистрации спонтанного электромагнитного излучения указывают на наличие нового, весьма актуального объекта фундаментальных исследований по изучению генерации и взаимодействия электромагнитных излучений с геосредой. При этом в геосреде реально работает совокупность механизмов их генерации, а спектр излучений характеризует меру энергонасыщенности геосреды. Разумеется, континуальная модель геосреды должна выступать в качестве частного случая моделей со структурой, пригодной для описания широкого спектра электромагнитных явлений.

Очерченному кругу проблем посвящается дальнейшее изложение, внимание акцентируется на новом методе геофизической разведки — АСЭМЭЗ, который в силу сходства объекта исследований, приборной базы, методики и используемого частотного диапазона излучений часто ошибочно трактуют в качестве некой разновидности метода ЕИЭМПЗ, предложенного и разработанного А. А. Воробьевым в конце 60-х — начале 70-х годов прошлого века.

Да, некоторые положения и предпосылки метода АСЭМЭЗ, их авторские трактовки и совокупность представленных экспериментальных данных отдельным профессионалам могут показаться недостаточными, неубедительными, а подчас и неправильными или противоречивыми. Однако не следует делать поспешных суждений по этому поводу: и эксперимент, и теория дают все более убедительные аргументы в пользу предлагаемой концепции. Во всяком случае, по нашему мнению, гораздо эффективнее тратить время на получение новых эмпирических фактов и их

осмысление, чем на оторванные от практики абстрактные рассуждения.

Геосреда и ее модели. В известных геофизических методах электроразведки используется модель геосреды в виде пассивного континуума, которая характеризуется феноменологическими характеристиками, определенными в лабораторных условиях. При этом взаимодействие геосреды с электромагнитным полем описывается в рамках электродинамики сплошных сред.

В 70—80-х годах прошлого века, на основе обобщения многочисленных экспериментальных исследований физических характеристик горных пород в огромном петрографическом и фаціальном разнообразии и широком диапазоне термодинамических условий, в Институте физики Земли АН СССР под руководством академика М. А. Садовского создано новое учение о геосреде [Садовский, Писаренко, 1991, Садовский, 2004]. Согласно ему геосреде присущи следующие характерные особенности [Николаев, 2002]: активность, иерархическая неоднородность, нелинейность, выраженная во взаимосвязи физических характеристик и процессов, изменчивость во времени физических свойств.

Охарактеризуем указанные характерные особенности более детально. Характерными признаками активных сред являются [Васильев и др., 1979]:

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

При этом необходимо считать среду многофазной, т.е. учитывать ее твердую, жидкую и газовую компоненты. В такой структурно-неоднородной среде нелинейным явлениям присущ ряд нетипичных особенностей:

- наличие доминантных частот;
- наличие механизмов переноса энергии колебаний в низкочастотную или высокочастотную области спектра;
- отклик такой нелинейной системы на внешнее воздействие может быть разным в зависимости от условий самовозбуждения в данный момент времени.

Для активных сред характерно также наличие самоподдерживающихся колебательных движений, представляющих одну из форм

диссипации энергии, при этом спектр колебаний характеризует меру энергонасыщенности системы. Такие системы способны формировать различные пространственно-временные структуры активности, представляющие собой импульсы и фронты возбуждения, неустойчивость которых приводит к установлению в системе самоподдерживающихся колебаний с определенной пространственной конфигурацией.

Важный аспект проблемы описания геосреды — учет ее фрактальной структуры, наглядным выражением которой является иерархически упорядоченная система блоков земной коры. Можно сказать без преувеличения: если вещество не находится в газообразном или кристаллическом состоянии, то оно имеет в некотором диапазоне масштабов фрактальную структуру [Зосимов, Лямшев, 1995]. И хотя фрактальные свойства, казалось бы, и не относятся к основным параметрам объектов или процессов, наличие фрактальной структуры может в ряде случаев принципиально изменить их свойства. В частности, фрактальные системы, как правило, обладают более высокими удельными мощностями излучения и необычной (дробно-степенной) зависимостью интенсивности излучения от расстояния. В настоящее время, очевидно, нет сомнений в том, что твердотельные фрактальные среды, сформированные в условиях диссипации энергии в открытой системе — геосреде и являющиеся самоорганизованными структурами, представляют собой особый тип структурного состояния вещества, характеризующегося существенными изменениями многих его физических свойств.

Как известно, в последнее десятилетие наблюдается интенсивное проникновение в геофизическую науку методов нелинейной динамики. В частности, получены результаты по динамике геосреды [Спивак, Кишкина, 2004], многие аспекты которой получили адекватную интерпретацию в терминах динамических систем [Генштафт, 2009]. Такие понятия, как регулярные и хаотические аттракторы, устойчивость, бифуркация и др., прочно вошли в обиход исследований, связанных с изучением литосферы как открытой диссипативной системы, характерными свойствами которой являются:

- диссипативность динамики;
- компенсация энергетических потерь за счет действия внешних (эндогенных и экзогенных) источников;
- активность составных элементов, спо-

собных генерировать разнообразные типы сейсмических и электромагнитных возмущений — от простых одиночных импульсов до хаотических. Напомним, что в пространстве состояний систем с диссипацией хаос ассоциируется с присутствием странного аттрактора [Кузнецов, 2011].

Системы, в которых возможно возбуждение автоколебаний (автоволн), называются возбуждаемыми. Термин «автоволны» подчеркивает тот факт, что их характеристики (форма, скорость распространения) определяются параметрами среды и практически не зависят от начальных условий.

К сожалению, нелинейно-динамические подходы к описанию и анализу геосистем сталкиваются со значительными трудностями, связанными с их необычностью, сложностью, с отсутствием в ряде случаев понимания архитектуры блоков, слагающих среду, и принципов межблочных взаимодействий. Неустойчивость и пороговый характер их самоорганизации описываются нелинейными уравнениями. Отличительные признаки нелинейных диссипативных систем — необратимые изменения во времени, пространственная и временная иерархическая делимость, недетерминированность поведения после прохождения критической точки (бифуркация), волновая (автоволновая) и резонансная природа процессов [Генштафт, 2009]. Важный аспект рассматриваемой проблемы — экспериментальное обнаружение и теоретическое обоснование наличия волн «маятникового типа» в системе массивных блоков, разделенных мягкими прослойками [Айзенберг-Степаненко, Шер, 2007]. Их отличительная особенность — большая длина, малая скорость распространения (значительно меньше скорости волн в блоке) и относительно слабое затухание. Существенно, что перемещение блоков в основном сосредоточено вдоль их границ и включает процессы дробления, деформации и пластического течения отдельных частей, зацепления механической и физико-химической природы, объемного деформирования и разрушения в пограничных слоях блоков [Даниленко, 1992; Старостенко и др., 2001; Садовский, 2004; Дубровский, Сергеев, 2006].

В качестве ведущего переменного фактора, определяющего текущую нестабильность геосреды вблизи состояния, близкого к критическому, по мнению ряда исследователей, может служить восходящий поток легких га-

зов (водород, гелий), а изменчивость ее параметров, которая может быть достаточно быстрой, является результатом его непрерывного взаимодействия с твердой фазой литосферы [Гуфельд, 2007 и др.]. Важно, 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].

Очевидно, в рамках таких представлений геосреда, стремящаяся к самоорганизации, нуждается в новых моделях описания и анализа, которые бы позволили отобразить процесс диссипации поступающей в нее энергии из низов литосферы, релаксацию локальных напряжений, стационарные режимы деформирования, генерацию и распространение акустосейсмоэлектромангнитной эмиссии [Шуман, 2010б; 2011].

Таким образом, неравновесность, нелинейность, неустойчивость структуры — неотъемлемые характеристики геосреды, которые неизбежно влияют на протекающие в ней процессы, в том числе электромагнитные. В такой среде следует ожидать появления излучений со свойствами, которые не могут быть установлены и описаны в рамках классического подхода.

Качественная картина генерации и распространения спонтанных электромагнитных сигналов литосферы и возможности их электродинамического описания. Как свидетельствует обширный эксперимент, на границе «земля—воздух» наблюдается большое разнообразие электромагнитных возмущений различной природы, регистрируемых в исключительно широком диапазоне частот — от 10^{-4} до 10^6 Гц и выше. Одни из них возбуждаются источниками в атмосфере (грозовые разряды, предгрозовое излучение, непрерывно-шумовое радиоизлучение грозовых облаков и циклонов), другие — в магнитосфере и ионосфере в результате взаимодействия солнечного ветра с геомагнитным полем или проникают в магнитосферу из межпланетной среды, третьи генерируются внутриземными источниками [Atmospheric..., 1999; Сурков, 2000; Gershenson, Vambakidis, 2001; Гульельми, 2007; Шуман, 2011; 2012а, б]. При этом шумоподобная компонента электромагнитного излучения литосферного происхождения составляет заметную долю в общем балансе регистрируемого поля естественного происхождения. Установлено, что эта компо-

нента суммарного излучения имеет сложные спектральный состав и пространственную структуру. Она существенно неоднородна. Отмечается, что генерация электромагнитного излучения происходит 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 вынужденных сигналов [Левшенко, 1995]. В зависимости от того, приходят ли электромагнитные сигналы в пункт регистрации из сейсмического очага, с фронта сейсмической волны или возбуждаются сейсмической волной непосредственно в окрестности точки регистрации, 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 в магнитном поле земного ядра ответственен за генерацию — за счет вектора перемещений элемента земной коры \mathbf{u} , скорости деформации $\mathbf{v} = d\mathbf{u}/dt$ или ускорения $\mathbf{w} = d\mathbf{v}/dt$.

Предложено общее линейное уравнение генерации, включающее все эти механизмы генерации [Левшенко, 1995; Гульельми, 2006; 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 атмосферно-ионосферного происхождения по латерали, в то время как источники в литосфере генерируют поля с повышенным поверхностным градиентом.

Установлено, что интенсивность спонтанной электромагнитной эмиссии литосферы контролируется в общем случае суммарным действием внешних и внутренних сил. Ее характеристики определяются частотным диапазоном, районом регистрации, резонансными и релаксационными процессами, свойствами и процессами исследуемого массива или блока горных пород. Наблюдается ее модуляция приливной силой [Левшенко, 1995].

Заметим, что полученные экспериментальные результаты не всегда трактуются однозначно [Шуман, 2012а, б]. Далее, с понятием «шум» в обыденном сознании ассоциируется

термин «помеха», наличие которой обычно только ухудшает ситуацию. Однако, как свидетельствует наш обширный полевой эксперимент, информативность электромагнитного шума литосферного происхождения килогерцового диапазона при изучении структуры и динамики геосреды в ряде случаев может значительно превосходить информативность регистрируемых возмущений более низкочастотной области спектра (в частности, ультранизкочастотных волн — геомагнитных пульсаций, наиболее регулярных естественных электромагнитных полей в диапазоне от 0,3 до 600 с).

Несмотря на определенные успехи, достигнутые в исследовании литосферных излучений, ряд принципиальных физических вопросов, связанных с условиями генерации высокочастотного электромагнитного шума литосферы, как нам представляется, разработан все еще недостаточно совершенно [Шуман, 2012а, б]. Основные нерешенные проблемы сосредоточены в области быстрых процессов изменений параметров геосреды. Как уже отмечалось, в качестве основного переменного фактора контролирующего текущую неустойчивость литосферы и стимулирующего обмен энергией между отдельными ее элементами, могут служить восходящие потоки легких газов (водород, гелий). При этом обычно рассматривают три основных процесса, обуславливающие неустойчивость литосферы при прохождении через нее легких газов: формирование пористости с высоким внутренним давлением газов, междоузельная диффузия, фазовые переходы по высокотемпературному типу в присутствии гелия [Гуфельд, 2007].

Отметим, что при рассмотрении вопросов распространения электромагнитных возмущений земная кора в большинстве работ принимается в качестве пассивного континуума. Это пористая флюидонасыщенная среда, обладающая магнитной структурой и находящаяся в подмагничивающем поле земного ядра. Использование такой модели вполне допустимо и оправдано, однако, нет оснований полагать, что указанный подход в состоянии объяснить все возможные явления в литосфере. Как свидетельствует обширный натурный эксперимент, в суммарном излучении присутствует составляющая — спонтанная электромагнитная эмиссия, обладающая специфическими свойствами и нуждающаяся, по-видимому, в иных подходах [Шу-

ман, Богданов, 2008; Богданов и др., 2009а,б; Шуман, 2007; 2010а; Старостенко и др., 2009] и в использовании иной электродинамической модели геосреды — активной диссипативной структуры [Шуман, 2010 а, б; 2012а, б].

Неравновесность, нелинейность, неустойчивость структуры геосреды — основные исходные принципы, на которых, по нашему мнению, должна строиться теория спонтанной электромагнитной эмиссии литосферы. В частности, идеи об активной роли геосреды позволяют с иных идейных позиций подойти к проблеме генерации и распространения электромагнитных возмущений в ней. Эту проблему 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. При этом под структурой системы будем понимать способ организации ее элементов и характер связей между ними.

Как уже отмечалось, твердотельные структуры, самоорганизующиеся в открытых системах, являются фрактальными [Золотухин и др., 2005]. Характерные признаки фрактальных структур — самоподобие, масштабная инвариантность, структурная иерархия и фрактальная размерность. В такой сложной структурированной системе (геосреде) существуют комплексы нелинейных взаимодействий между физическими полями, структурами и целыми подсистемами. При этом аккумуляция и передача больших порций энергии из низов литосферы сопровождается генерацией взаимодействующих сейсмических, гидродинамических, электромагнитных и тепловых возмущений, распространяющихся в литосфере и диссипирующих в ней.

Отметим, что, в соответствии со знаменитой флуктуационно-диссипативной теоремой статистической физики [Кадомцев, 1994; Ильинский, Келдыш, 1989], механизм любой диссипации является одновременно и механизмом рождения флуктуаций. Именно благодаря этой связи флуктуации в диссипативной системе никогда не исчезают, а поддерживаются на уровне, диктуемом ее дискретностью. В частности, она связывает спектральную плотность флуктуаций токов с антиэрмитовой частью тензора диэлектрической проницаемости [Виноградов, Дорофеев, 2009]. С этой точки зрения можно утверждать,

что электромагнитные флуктуации представляют собой часть фундаментального природного явления — броуновского движения.

В последние годы пришло осознание типичности хаотического поведения нелинейных диссипативных систем. Такие системы способны формировать различные пространственно-временные структуры активности, представляющие собой импульсы и фронты возбуждения, неустойчивость которых приводит к установлению в системе самоподдерживающихся колебаний с определенной пространственной конфигурацией. При этом достаточно располагать источником энергии, чтобы самовозбуждение колебаний стало возможным. Существенно, что образование фрактальных агрегатов в таких системах резко увеличивает мощность создаваемого в них излучения.

Таким образом, акустосейсмоэлектромагнитный шум литосферного происхождения — универсальный эффект, обусловленный только наличием диффузии. В геосреде диффузионную природу имеет просачивание флюидной компоненты, и поэтому реализуются условия возникновения фрактального геометрического шума литосферы [Зосимов, Лямшев, 1995, с. 391].

Заметим, что сейсмические шумы также охватывают очень широкий диапазон частот. Их обычно разделяют на низкочастотные (от долей до первых единиц герц), высокочастотные (до нескольких десятков герц) и сейсмоакустические (от десятков герц до нескольких килогерц). В качестве равнозначных часто используют такие термины, как сейсмическая и сейсмоакустическая эмиссия или излучение, сейсмоакустические и геоакустические шумы. Важно, что сейсмические шумы непрерывны. В них отчетливо проявляются различные частоты внешних воздействий — лунно-суточные приливы, штормовые микросейсм и др. Активизация их источников коррелирует с действием внешних полей, которые усиливают, а не ослабляют сейсмические шумы.

Заметим, что большинство исследователей этих явлений склонны связывать механизмы сейсмических шумов с излучением упругой энергии множеством трещин и трением подвижных элементов геосреды. Однако трудно себе представить непрерывность процессов трещинообразования, поскольку процесс трещинообразования дискретен, а плотность трещин в массиве горных пород ограничена. Кроме того, как свидетельствуют теоретиче-

ские расчеты, постоянно действующие фоновые поля также не могут выступать в роли деформационных источников непрерывного планетарного сейсмического шума [Gufeld et al., 2011]. По этой причине в настоящее время источники его происхождения предпочитают связывать с процессами флюидодинамики и дегазации. Наиболее адекватной моделью этих процессов во фрактальной геосреде является модель скалярного фронта градиентной перколяции (просачивания, протекания, фильтрации). Учитывая, что нелинейным системам, как правило, присуща множественность процессов и механизмов, указанную модель, в общем виде, следует рассматривать как одну из моделей (частный случай) фронта самоорганизованной критичности. Таким образом, сейсмоакустический шум можно рассматривать как одно из проявлений неравновесного самоорганизованного критического явления.

Можно предположить, что ассоциируемый с этим распространяющимся фронтом диссипативный всплеск диэлектрической проницаемости при рассеивании на покоящихся или движущихся зарядах, сгустках зарядов или диполях, содержащихся в геосреде или появляющихся в ней в этом процессе, в свою очередь формирует широкодиапазонный фрактальный спектр электромагнитного излучения. Важно, 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 (геосреды) обычно имеется некий максимальный масштаб, ограничивающий область их фрактального поведения. При этом на масштабах, превышающих его, и, следовательно, на низких частотах имеют место обычные закономерности распространения возмущений, в том числе и обычный спектр излучений. Однако в арсенале современных экспериментальных методов геофизики обычно отсутствует анализ фрактальных параметров геосреды, что существенно снижает получаемую о ней информацию. Обычно отсутствует и понимание архитектуры геосреды в исследуемой области, а также принципов межсистемных и межблочных взаимодействий в ней.

К сожалению, проблема материальных уравнений, необходимых для электродинамического описания геосреды как неравновесной диссипативной динамической системы

с фрактальной структурой может, оказаться очень сложной [Шуман, 2012а]. При этом ее адекватное описание возможно лишь посредством нелинейных уравнений. Отмечается разнообразие волновых структур в активных средах. Это автоволны, волны переключения и пики. Напомним, что автоволны — разновидность самоподдерживающихся волн в активных средах, содержащих распределенные источники энергии, а пики — неподвижные и пространственно-локализованные структуры. Экспериментально установлено также существование спиральных (геликоидальных) автоволн — незатухающих низкочастотных колебаний, обусловленных наличием подмагничивающего поля в среде распространения [Давыдов и др., 1991].

Как известно, автоколебания соответствуют условию, при котором отклик системы на внешнее воздействие не пропорционален воздействующему усилию. Перечень типов автоволновых процессов, известных к настоящему времени, довольно обширен. Это распространяющиеся возмущения в виде бегущего импульса, стоячие волны, синхронные автоколебания во всем пространстве, диссипативные структуры [Васильев и др., 1979]. Среди последних можно выделить три класса: временные, пространственные и пространственно-временные.

Общепринятым описанием возникновения и эволюции пространственно-временных структур (автоволн) в возбудимых (активных) средах являются многокомпонентные системы уравнений типа «реакция—диффузия» [Давыдов и др., 1991]. Типичный класс моделей этого типа описывается уравнением

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \nabla^2 u + F(u),$$

где $u = u(r, t)$ — функция пространственных переменных $r \in D \subset R^n$ и времени t (возможно, векторная), определяющая состояние системы; ∇^2 — оператор Лапласа, задающий диффузионный тип пространственного взаимодействия элементов структуры; α — коэффициент диффузии.

При этом граничные условия обычно задаются либо периодические, либо описывают отсутствие потока через границы элементов (ячеек).

Динамика функции u определяется как собственной динамикой функции $F(u)$, так и характером взаимосвязей с соседними элементами.

С учетом универсального характера данного обстоятельства, предложено обобщенное нелинейное уравнение генерации переменного магнитного поля \mathbf{B} [Шуман, 2007; Цифра, Шуман, 2010]:

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

где B_i — компонента магнитной индукции; $\alpha_{ij} = c^2 / 4\pi\sigma_{ij}$ — матрица диффузии; σ_{ij} — матрица проводимости; $F_i(\mathbf{B})$ — нелинейная функция, определяемая динамикой процессов взаимодействия геосреды с восходящим потоком легких газов и экзотермичных реакций и в конечном счете разнообразными механизмами механоэлектромагнитных преобразований.

Разумеется, общей теории сред рассматриваемого типа не существует и каждый достаточно проработанный пример, как правило, дает образцы новых типов их динамики и самоорганизации. Однако можно не без оснований утверждать, что природа акустосейсмической и электромагнитной эмиссий состоит в трансформации собственной энергии геосреды в различные локально неустойчивые состояния, которые и являются источниками эмиссий [Шуман, 2010а, б; 2012а, б]. При этом энергетическая накачка геосреды способствует формированию активных систем, характеризующихся нелинейной динамической совокупностью физических полей и автоволновыми механизмами переноса флюидной фазы. С фронтом концентрации флюида связано формирование «волн» комплексной диэлектрической проницаемости, процесс рассеяния (трансформации) которой и ведет к образованию электромагнитных а также и других «волн» (возмущений). Очевидно, эти процессы реализуются преимущественно вдоль границ блоков и вдоль разломов, где наблюдается наиболее активная циркуляция флюидной фазы.

Сложность проблемы генерации и распространения электромагнитных флуктуаций литосферного происхождения состоит в том, что необходимо учитывать возможность различного физического содержания процессов генерации. В этом контексте подходы, основанные на идеях нелинейной динамики, являются одним из наиболее перспективных направлений исследований этих явлений. В частности, на основе аксиоматической теории показано, что в неоднородных системах источником генерации распространяющихся волн могут

быть области, в которых собственная частота колебаний выше, нежели в окружающем пространстве. Источники такого типа получили название водителя ритма или пейсмекера. В случае наличия нескольких таких источников среда синхронизируется самым высокочастотным из них [Васильев и др., 1979].

Таким образом, в распределенных активных системах, к числу которых может быть отнесена и геосреда, могут рождаться, распространяться и преобразовываться разнообразные и сложные волновые процессы, адекватным методом изучения которых является качественная теория квазилинейных параболических систем [Васильев и др., 1979].

Теоретические предпосылки и сравнительная характеристика методов ЕИЭМПЗ и АСЭМЭЗ. Как уже упоминалось, в основе методов ЕИЭМПЗ и АСЭМЭЗ лежит явление импульсной электромагнитной эмиссии килогерцового диапазона, генерируемой геосредой и регистрируемой в скважине, на земной поверхности или над нею. Ее возникновение традиционно связывали с образованием заряженных дислокаций, трещинообразованием, нарушением связей адгезионной природы, электрокинетическими явлениями, релаксационными и разрядными процессами, пьезоэффектом, источниками в атмосфере, ионосфере и магнитосфере Земли и др. Существенно, что процессы и механизмы генерации и распространения регистрируемых электромагнитных возмущений весьма разнообразны и реально в природе работает их совокупность.

При регистрации импульсного электромагнитного излучения рассматриваемого частотного диапазона обычно фиксируется интегральная интенсивность потока импульсов и исследуется его пространственное распределение. 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., 2009б]. Однако реальный вид сигнала из-за ограниченных возможностей инструментальной базы не идентифицируется, что существенно затрудняет изучение и идентификацию механизмов генерации и глубинную локализацию источников излучения.

Методы ЕИЭМПЗ и АСЭМЭЗ имеют и существенные различия, касающиеся трактов-

ки механизмов генерации и распространения электромагнитных возмущений, интерпретации наблюдаемых данных и сфер их применения. Остановимся на главных, по нашему мнению, из них, сводя воедино и акцентируя соответствующие аргументы.

Метод ЕИЭМПЗ. В основе метода — явление импульсной электромагнитной эмиссии, генерируемой геосредой, возникающей как на уровне протекания физико-химических процессов в минералах, слагающих горную породу, вследствие изменения термодинамических условий в земных недрах, так и в процессе деформации горных пород под воздействием механических нагрузок. Работы по исследованию ЕИЭМПЗ, начатые по инициативе А. А. Воробьева в конце 1960-х годов, были направлены на создание методов контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород и прогноза геодинамических явлений различного энергетического класса.

Импульсное электромагнитное поле, регистрируемое на земной поверхности, состоит из трех компонент: излучений, источники которого расположены в земной коре, атмосферно-ионосферного происхождения и техногенных электромагнитных полей. Метод реализуется путем измерения импульсного потока излучений в килогерцовом диапазоне частот и его пространственного распределения.

Существует несколько точек зрения на физическую природу источников излучения литосферы. В частности, оно может быть связано с процессами разрушения в твердой фазе горных пород и его подготовкой, с электрокинетическими эффектами в их жидкой фазе или является проявлением сегнето- или пьезоэлектрических свойств горных пород. Существуют также импульсы литосферного происхождения, возникающие в среде под действием акустических или сейсмических колебаний. Характеристики литосферной составляющей ЕИЭМПЗ изменяются в пространстве на структурных неоднородностях земной коры, имеют временные вариации, вызванные изменением механических напряжений под действием тектонических процессов, приливных деформаций, атмосферного давления. При этом понятие геосреды, имеющее до последнего времени в рассматриваемом методе механический или, скорее, механистический характер, становится более широким и более соответствующим представлением физики твердого тела.

Экспериментально установлено, что изменение параметров электромагнитного излучения литосферного происхождения — многофакторный процесс, зависящий от физических свойств горных пород, их генетического типа и структурно-текстурных особенностей. Останемся на этих вопросах более подробно.

Как свидетельствуют многочисленные лабораторные опыты с природными материалами (см., например, [Сурков, 2000] и цитируемую там литературу), спектр электромагнитных полей, генерируемых при их разрушении, достаточно широк, его диапазон составляет от 10 Гц до 1 МГц. При этом максимум интенсивности приходится, по разным данным, на диапазон от 1 до 50 кГц. Как уже упоминалось, к числу возможных механизмов механоэлектрических преобразователей в земной коре относится достаточно широкий спектр явлений. Это либо электрическая поляризация среды, возникающая при механических напряжениях в кристаллах диэлектрика, в минералах и горных породах, либо электризация — появление избыточного электрического заряда. При этом поляризация среды возникает на различных структурных уровнях, начиная с дефектов кристаллической решетки и заканчивая границами зерен, трещинами, порами и другими макроскопическими неоднородностями. В качестве возможной причины поляризации среды рассматривается также пьезоэффект. Предполагается, что процессы образования и релаксации зарядов на бортах микротрещин, образующихся при разрушении горной породы, возбуждают широкополосный электромагнитный шум, который диссипирует в среде распространения и превращается в УНЧ колебания с верхней границей порядка 1 Гц.

Трудность исследования этого круга явлений состоит в отсутствии конкретных данных о параметрах механоэлектрических преобразований на глубине. По этой причине в работах этого направления выдвигаются скорее гипотезы, чем предлагаются теоретические модели. Обычно вся совокупность упомянутых механизмов генерации электромагнитных возмущений нередко рассматривается в теории в качестве возможных причин происхождения регистрируемых сигналов. При этом зачастую игнорируется тот факт, что рассматриваемые электромагнитные возмущения радиоволнового диапазона испытывают в проводящих породах земной коры сильное поглощение. Таким образом, очевидно,

они могут выйти из очагов генерации на земную поверхность лишь в том случае, если их частотный спектр лежит в области прозрачности для электромагнитных волн или источники генерации находятся в скин-слое для этого частотного диапазона. Ясно, что в случае выхода излучения из глубинного очага генерации необходимо предположить существование в нем полей чрезвычайно высоких напряжений или волновых каналов. Однако имеющаяся совокупность экспериментальных данных, вообще говоря, не свидетельствует о механизме генерации, основанном на электрическом пробое ни в горных породах на глубине, ни в воздухе вблизи земной поверхности. По этой причине внимание исследователей концентрировалось на рассмотрении ансамбля излучателей, связанных с ансамблем раскрывающихся трещин и реализаций эффекта «когерентного» усиления излучаемого очагом электромагнитного сигнала. С этих позиций вполне объясним также и интерес к использованию более низких частот, относящихся к УНЧ диапазону или к еще более низким частотам, на которых мощность скин-слоя достаточно велика.

Заметим, что для радиоизлучения мегагерцового и килогерцового диапазона мощность скин-слоя для типичных геоэлектрических условий составляет соответственно порядка 10 и 150—200 м. По этой причине оно не может выходить из глубинных очагов генерации. В приповерхностном же слое зачастую весьма проблематично найти достаточное количество источников излучения, но еще труднее связать его с геодинамическими процессами на глубине [Сурков, 2000].

Подчеркнем еще раз: при анализе всех упомянутых механизмов и источников генерации излучения предполагалось, что геосреда — пассивный континуум. Это пористая флюидонасыщенная среда, обладающая в общем случае магнитной структурой и находящаяся в подмагничивающем магнитном поле земного ядра. При этом взаимодействие геосреды с электромагнитным полем описывается в рамках электродинамики сплошных сред. При рассмотрении такого рода задач характерно использование «нормальных» электромагнитных волн, характеризующихся определенным значением круговой частоты ω и волнового вектора \mathbf{k} , удовлетворяющих однородному волновому уравнению и достаточно полно характеризующих свойства среды распространения. Как известно, общее

решение уравнений Максвелла в этом случае содержит линейную комбинацию всех «нормальных» волн, граничные условия однозначно определяют их амплитуду, а взаимодействие среды и поля задается параметрами материальных уравнений. Скиновая глубина в квазистационарном приближении, определяющая глубинность метода, оценивается на основе выражения

$$h = \sqrt{2/\mu_0 \omega \sigma},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная, σ — проводимость среды, ω — круговая частота.

Однако регистрация только интегральной интенсивности потока импульсов существенно затрудняет идентификацию регистрируемого сигнала, механизм его генерации и определения его источников. Поэтому на практике при определении геометрических параметров и глубины погружения аномального объекта (его центра тяжести), который генерирует излучение, обычно исходят из упрощенных моделей. В частности, его аппроксимаций в виде шара, кругового цилиндра, горизонтальной или вертикальной пластины и использованию связей между характерными точками аномальной кривой плотности потока излучения вдоль профиля наблюдений с их геометрическими параметрами [Бесмертный, Соломатин, 1999; Чебан, 2001].

Метод ЕИЭМПЗ ориентирован в основном на решение инженерно-геологических задач и изучение напряженно-деформированного состояния приповерхностных горизонтов и объектов разреза. Ясно также, что не предполагается его использование при исследованиях на акваториях, когда трасса распространения излучения при его выходе на поверхность содержит участок, соответствующий хорошо проводящему слою морской воды.

Необходимо отметить, что плотность и мощность потока ЕИЭМПЗ зависит от масштаба геологических процессов. При этом не следует ограничиваться рассмотрением только одного механизма генерации излучения, в частности, связанного с изменением напряженного состояния массива пород и развития микродеформаций локального характера. Очевидно, синхронно с периодами динамичности в напряженно-деформируемом состоянии горного массива активизируется не только трещинообразование и связанное с ним электромагнитное излучение, но и происходят и активизируются процессы диффузии флюидной компоненты геосреды с возмож-

ным выносом и образованием зарядов. Ясно, что распределение в нем излучателей электромагнитного излучения не будет совпадать с мозаикой сформировавшихся в среде напряжений, а будет определяться как упомянутыми выше факторами, так и локальными коэффициентами трансформации механической энергии в электромагнитную. Иначе говоря, в случае расположения источников электромагнитного излучения в пределах мощности скин-слоя, как это обычно предполагается в методе ЕИЭМПЗ, условие его генерации будет определяться как механическими свойствами пород (в частности, модулем упругости) так и, что существенно, коэффициентами механоэлектромагнитного преобразования. Очевидно, следует ожидать, что его характеристики, обусловленные ансамблем излучателей различного масштабного уровня, будут в большей степени определяться условиями нагружения блоков горного массива, чем их физическими свойствами. Однако такая трактовка не является исчерпывающей, хотя она и опирается на лабораторный эксперимент. Природная среда существует и эволюционирует в пространстве и во времени, на много порядков больших, чем в любых лабораторных опытах.

Метод АСЭМЭЗ. Физическая основа метода — явление спонтанной электромагнитной эмиссии, генерируемой в литосфере в широком диапазоне частот и обладающей упорядоченной пространственно-временной структурой, тесно связанной со строением и динамикой геосреды.

Концептуальная новизна излагаемого нами подхода к исследованию спонтанной электромагнитной эмиссии литосферного происхождения состоит в привлечении идей нелинейной динамики, когда на передний план выступают неустойчивые системы и распределенные возбудимые среды, демонстрирующие большое разнообразие типов поведения и самоорганизации. Случайность и хаос, возникающие в таких системах и проявляющиеся в хаотической колебательной структуре вариаций геофизических полей, представляют собой неотъемлемое свойство системы.

Как известно, геологические объекты — это открытые системы, развитие которых определяется глобальными процессами энергетики, дегазации и динамики Земли. Основной продукт дегазации — флюиды, с позиций нелинейной динамики, представляют собой сложную открытую энергетически концен-

трированную динамическую систему, постоянно меняющую свой состав и свойства. Взаимодействие процессов дегазации и тектонического деформирования сопровождается нелинейными процессами, причем флюиды служат одним из основных факторов, определяющих нелинейность.

Таким образом, мы имеем дело со средой (геосредой), обладающей свойствами открытых диссипативных систем. В соответствии с флуктуационно-диссипативной теоремой статистической физики, механизм любой диссипации является одновременно и механизмом рождения флуктуаций. При этом роль начального возбуждения играет энергия низов литосферы, а аналогом автоволн, характерных для активных сред, служат локализованные неравновесные области — возмущения напряженно-деформированного состояния, формирующиеся и непрерывно изменяющиеся под воздействием флюидов. Непрерывное шумовое сейсмоакустическое и электромагнитное излучение, регистрируемое в геосреде в широком диапазоне частот, свидетельствует о высокой энергонасыщенности литосферы, а фрактальная структура сигналов дает основания искать механизм его генерации как некоторого критического неравновесного процесса.

Имеются весоные основания принимать в качестве источника сейсмоакустической и электромагнитной эмиссий фронты самоорганизованной критичности (ФСК). Наиболее адекватной их моделью в условиях фрактальной геосреды являются фронты градиентной скалярной перколяции. Как известно, проявление свойств перколяционного типа весьма вероятно в породах с низкой проницаемостью или в трещиноватых средах, а образование фрактальных агрегатов в таких системах резко увеличивает мощность создаваемого в них излучения. Показано, что даже реальные среды, не обладающие явной фрактальной геометрической структурой, демонстрируют свойства, характерные для фрактальных пористых сред [Гийон и др., 1991].

С экспериментальной точки зрения ФСК — наиболее энергетически активный источник излучений, а с термодинамической — представляет собой неравновесный фазовый переход в открытой системе. Заметим, что просачивание имеет диффузионную природу, и поэтому реализуются условия для возникновения фрактального геометрического шума. Это универсальный эффект, обуслов-

ленный только наличием диффузии [Зосимов, Лямшев, 1995]. Структура фрактального геометрического шума существенно неоднородна. В нем присутствуют возмущения различного происхождения.

Заметим также, что в неоднородных средах нет распространяющихся волн, волны являются стоячими [Раутиан, 2008]. Колебания с длиной волн, кратных характерному размеру неоднородностей (в частности, блоков), затухают значительно слабее волн, длина которых такова, что в блоках (неоднородностях) не могут возникать стоячие волны. В итоге среда ведет себя подобно набору резонаторов. При этом сопутствующее стоячей звуковой волне электромагнитное поле столь же слабо, как и звуковое, затухающее в среде, и в условиях резонанса может обладать весьма заметной амплитудой.

Конкретизируем теперь сам процесс механоэлектромагнитных преобразований. Как известно, в качестве основного преобразователя механической энергии в электромагнитную принимают механизм дипольного излучения зарядовой мозаики на бортах раскрывающейся трещины или их ансамбля [Гохберг и др., 1988; Сурков, 2000]. С фронтом самоорганизованной критичности, очевидно, связано формирование «волны» комплексной диэлектрической проницаемости, которая аналитически может быть представлена в виде функции диссипативного всплеска [Болотов, 2002]. Рассеивание этой «волны» проницаемости на покоящихся или движущихся зарядах, сгустках зарядов или диполей, содержащихся в геосреде или возникающих в ней при распространении ФСК, формирует широкодиапазонный спектр электромагнитного излучения.

В конечном итоге в геосреде формируется некоторое собственное электромагнитное поле, эволюционирующее во времени и пространстве. Проекция этой картины на земную поверхность может быть зафиксирована в процессе наземных, аэро- или даже космических съемок, хотя она и может оказаться сильно зашумленной приповерхностными и атмосферно-ионосферными эффектами.

Примечательно, что пространственные масштабы (параметры) аномалий интенсивности излучения слабо зависят от электромагнитных характеристик разреза, а определяются в первую очередь глубиной погружения «излучающих элементов». При этом в зависимости от условий их расположения, размеров,

физических свойств геосреды излучаемое поле, регистрируемое на земной поверхности, оказывается локализованным в своеобразном «конусе излучения» с углом у вершины от 60° до 82° , а в случае локального точечного излучателя — 71° [Дурандин, 2011]. В принципе, это позволяет восстановить структурный каркас исследуемого разреза или, по крайней мере, выполнить его содержательную визуализацию. Ясно, что в этом случае глубина проникновения поля, определяемая в приближении плоской волны, не является определяющим качественным динамическим свойством электромагнитного поля, удовлетворяющего уравнению диффузии.

Что нового дает полевой эксперимент для постановки и понимания проблемы? В настоящее время теоретические подходы к изучению механизмов генерации и распространения спонтанной электромагнитной эмиссии все еще ограничены лишь качественной стороной явления [Левшенко, 1995; Гульельми, 2007]. Не существует и модели геосреды, одинаково пригодной для описания всей совокупности излучений, регистрируемых на границе раздела «земля—воздух» или над нею. В этой ситуации представляется актуальным сконцентрировать внимание и усилия на анализе экспериментальных результатов.

Результаты выполненных в последние годы экспериментальных работ по регистрации спонтанного электромагнитного излучения как на суше, так и на акваториях позволяют, на наш взгляд, получить ответы на высказанные выше теоретические рассуждения. Не вдаваясь в подробности аппаратно-методического обеспечения проведения полевых работ методом АСЭМЭЗ, которые достаточно детально описаны в работе [Богданов и др., 2009а], остановимся лишь на отдельных характерных экспериментальных результатах.

Одним из главных аргументов наших оппонентов является вопрос о выделении литосферной составляющей на фоне большого разнообразия электромагнитных возмущений различной природы в широком диапазоне частот. В 2010 г. был проведен эксперимент по регистрации СЭМЭЗ в одном из штореков соляной шахты (г. Соледар, Донецкая область) на глубине порядка 260 м. Измерения проводились на прямолинейном участке шторека длиной 800 м в неработающей шахте при полном отсутствии активных и пассивных искусственных помех (кабели, рельсы, крепления и др.). При этом на поверхности проводились

синхронные измерения стационарной станцией, установленной над штореком. Сравнение полученных результатов измерений (рис. 1) показало полное отсутствие в показаниях подземного прибора влияния атмосферных источников — не установлено ни одного подобного одновременного всплеска. Несмотря на низкий уровень сигнала, обусловленного присутствием проводящих солевых отложений, установлен наклон соленосной и нижележащей свит, что свидетельствует о его литосферном происхождении.

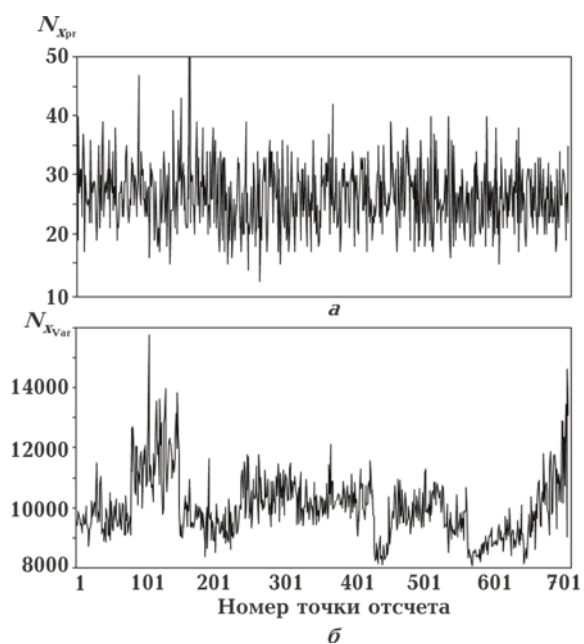


Рис. 1. Результаты подземных профильных измерений в штореке соляной шахты (а) и синхронных стационарных фоновых наблюдений СЭМИ на поверхности (б).

На рис. 2 приведены результаты аэросъемки интенсивности потока излучения вдоль профилей, пересекающих северную и южную прибортовые зоны ДДВ. Представляется очевидным подобие изменения интенсивности измеряемой величины, а также сходство, в общих чертах, пространственной структуры аномалии в пределах разломных зон, размеры которых, несмотря на их существенное различие, достигают двух десятков километров. Характерным является также появление узкого максимума вблизи центральной части разломных зон. Следует отметить, что наблюдаемый характер интенсивности излучения вблизи разломных зон качественно хорошо согласуется с распределением упругих напряжений вблизи так называемого концентрато-

ра напряжений. Это дает основание полагать, что пространственная структура аномалии в первую очередь определяется распределением упругих напряжений в литосфере.

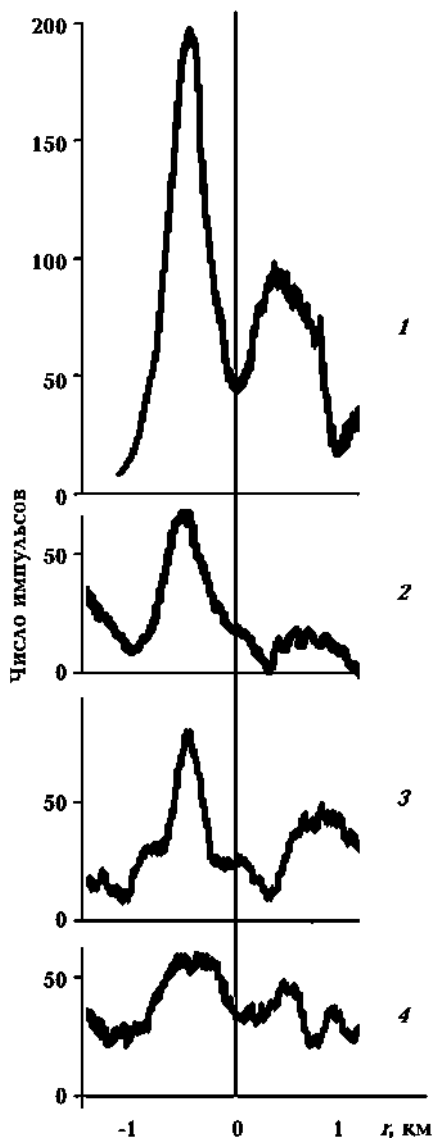


Рис. 2. Средняя интенсивность СЭМИ над разломной зоной, ограничивающей северный (1, 2) и южный (3, 4) борты ДДВ.

С целью исключения влияния двигателя на показания регистратора в 2011 г. впервые был использован планер, закрепленный на расстоянии 50 м от самолета. При этом из показаний аэрорегистратора были исключены фоновые значения излучения, зарегистрированные стационарной станцией. В качестве стационарной станции использован регистратор, технические характеристики и настрой-

ки которого полностью совпадали с таковыми для прибора, установленного на планере. Было выполнено несколько полетов по субмеридиональному региональному профилю, пересекающему некоторые разломы северного борта ДДВ. На рис. 3 показаны средние значения интенсивности потока (числа импульсов) после исключения фонового сигнала, полученные по четырем профилям. Вертикальной чертой показано положение разлома вблизи кровли кристаллического фундамента (глубина порядка 2,5—4 км). Следует отметить высокое сходство в характере изменения интенсивности потока: во всех случаях наблюдается раздвоенный асимметричный максимум, положение локального минимума совпадает с разломом кристаллического фундамента. Ширина максимума составляет порядка 800 м (по 400 м с каждой стороны от разлома), что, скорее всего, соответствует ширине приразломной зоны (зона влияния разлома). Кроме того, видно постепенное уменьшение интенсивности потока по мере удаления от центральной части ДДВ (все кривые приведены в одном масштабе).

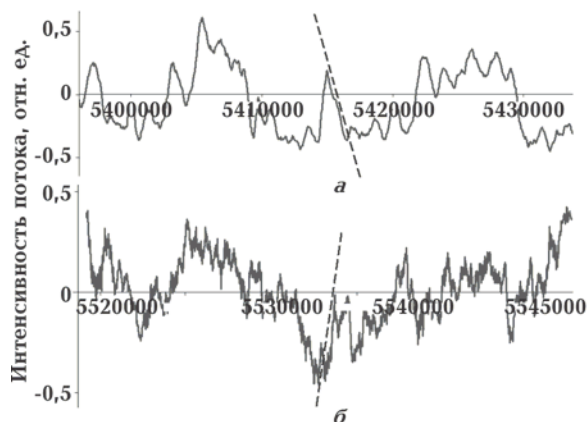


Рис. 3. Изменения интенсивности СЭМИ в приборной зоне ДДВ: а — южный борт, б — северный борт. Пунктирные линии — положение разломных зон.

Полученные данные позволяют качественно оценить вклад литосферной составляющей в суммарный сигнал. В среднем, число импульсов вдоль профилей изменялось в 20—30 раз, суммарный вклад глубинного сигнала мог составлять 20 %, а в некоторых случаях — заметно больше.

Пространственную устойчивость интенсивности излучения радиоволнового диапазона иллюстрирует также рис. 4, на котором показаны однотипные аномалии (отмечены

дугами) в вейвлет-преобразованном сигнале вдоль поперечных и продольных профилей над Межводненской структурой, расположенной на шельфе Черного моря вблизи Тарханкутского полуострова (Крым, съемка 2009 г.). Наличие устойчивых аномалий над Межводненской структурой, расположенной на акватории, свидетельствует о выходе излучения на земную поверхность через слой морской воды. Иначе говоря, наличие хорошо проводящей водной толщи не оказывает заметного влияния на результаты эксперимента [Шуман и др., 2011].

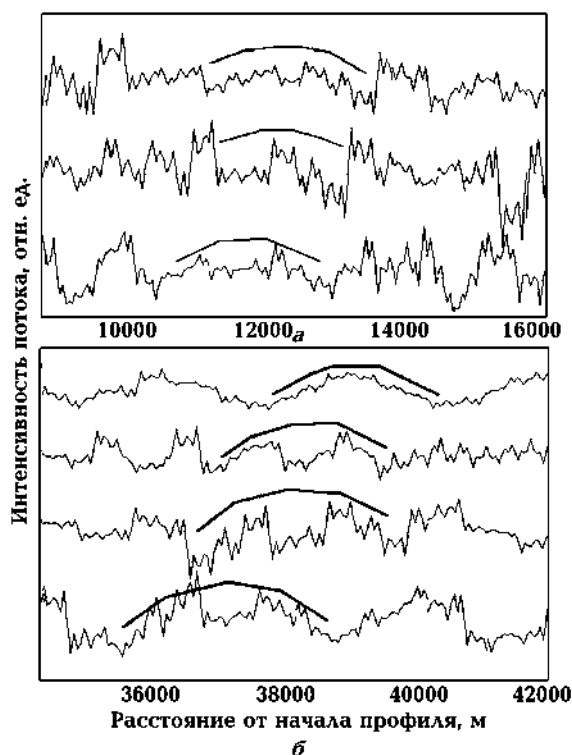


Рис. 4. Аномалия интенсивности СЭМИ над Межводненской структурой (Тарханкутская площадь) по нескольким близким поперечным (а) и продольным (б) профилям. Съемка 2009 г.

Остановимся на некоторых характерных примерах по регистрации СЭМИ на профилях при переходе суша—море. На рис. 5 приведены графики активности электромагнитного излучения, полученные с помощью летательного аппарата в 2009 г. по трем параллельным профилям, пересекающим береговую линию Тарханкутского полуострова в субширотном направлении. Положение береговой линии на рисунке показано вертикальной чертой. Расстояние между профилями составляет 1 км.

Видно, что характер записей СЭМИ на профилях (серый цвет — без усреднения, черный — с усреднением) при переходе от сухопутных к морским участкам не претерпевает существенных изменений. Следует также отметить достаточно высокое подобие в изменении исходного сигнала на соседних профилях, что указывает на его неслучайный характер и не позволяет отождествлять его природу с источниками верхней полусферы в силу их временной изменчивости.

Как уже отмечалось, одним из основных явлений, обеспечивающих в конечном счете генерацию СЭМИ, является дегазация земных недр, интенсивность которой, как известно, усиливается вблизи разломных зон. Одно из проявлений восходящей миграции флюидов — формирование геохимических аномалий в приповерхностном грунте, в частности, над залежами углеводородов. В этой связи в 2011 г. впервые было проведено сопоставление результатов метода АСЭМЭЗ и геохимических исследований грунта в районе Базалеувской площади ДДВ (рис. 6). Обращает на себя внимание хорошее пространственное соответствие большинства локальных максимумов при отсутствии строгой зависимости между их амплитудами (что и не удивительно ввиду различной природы явлений). Такое соответствие можно рассматривать как подтверждение важной роли дегазации в формировании СЭМИ, хотя, безусловно, для более надежных выводов необходимы дополнительные исследования.

Изменение неоднородности поля СЭМИ вдоль линии профиля, пересекающего в широтном направлении структуру Субботина на Прикерченском шельфе Черного моря (глубина моря 50—60 м), показано на рис. 7. Усреднение данных всех наблюдений при полетах в полосе порядка ± 600 м практически исключает влияние субъективного фактора на конечный результат. Как следует из рисунка, геометрия выделяемых сейсморазведкой структур (внизу показан схематический сейсмогеологический разрез [Ночвай та ін., 2003]) уверенно проявляется в усредненном исходном сигнале СЭМИ.

Существенным результатом экспериментальных наблюдений является постоянство характера изменения исходного сигнала СЭМИ во временном масштабе. На рис. 8 показаны изменения интенсивности активности электромагнитного излучения вдоль профиля в северо-западной части Черного моря,

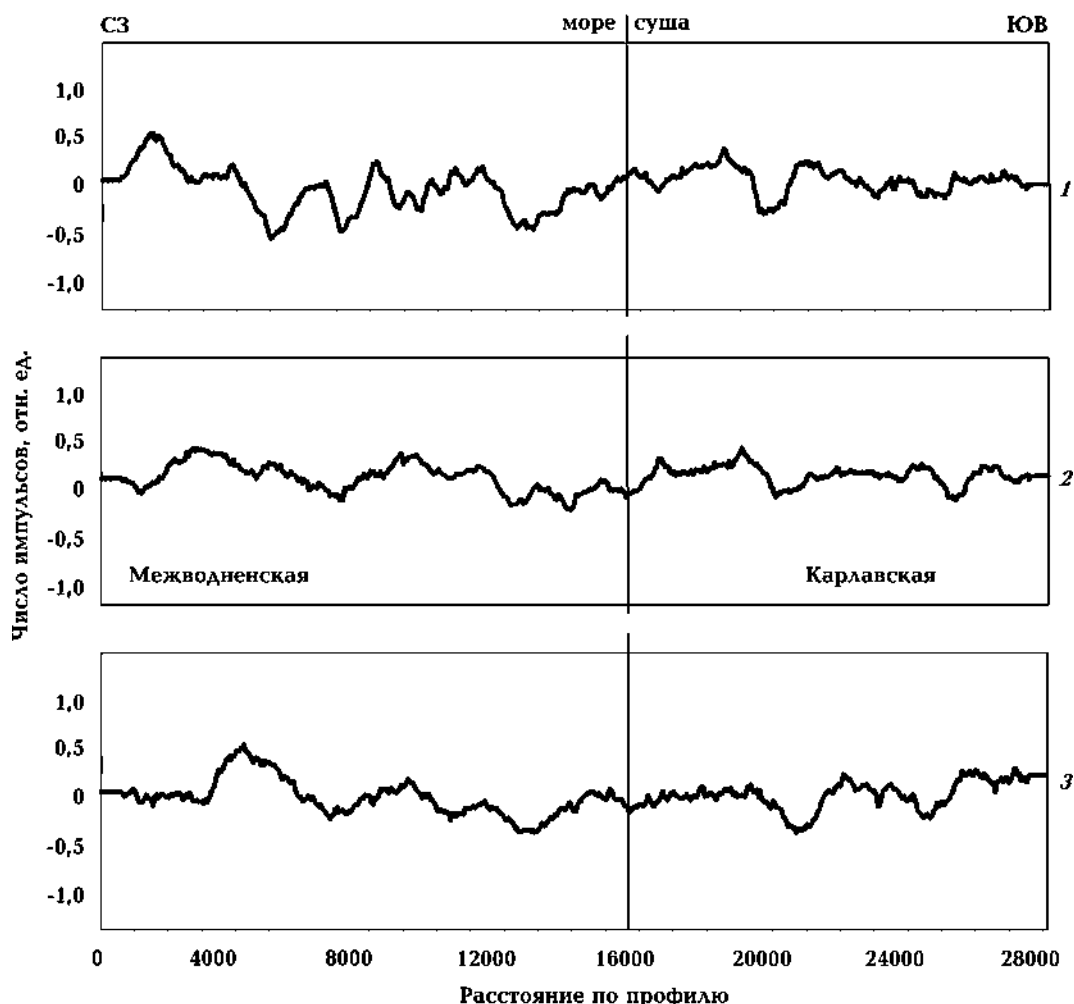


Рис. 5. Графики распределения исходного сигнала СЭМИ, зарегистрированные с летательного аппарата по трем параллельным профилям, пересекающим береговую линию Тарханкутского полуострова (северо-западный шельф Черного моря).

зарегистрированные в 2007 и в 2010 г. соответственно с борта НИС «Владимир Паршин» [Богданов и др., 2007] и «Профессор Водяницкий» [Коболев, 2011].

Таким образом, приведенные примеры уверенно указывают на наличие устойчивой литосферной компоненты электромагнитной эмиссии, которая обуславливает порядка 20 % суммарного излучения в приземной атмосфере в радиоволновом диапазоне частот. Пространственная структура аномалий при повторных измерениях над одними и теми же геологическими объектами является сходной при отсутствии полного совпадения. Связь излучения прослеживается с геологическими объектами, расположенными на глубинах от нескольких километров до нескольких десят-

ков километров, на порядки превышающих толщину скин-слоя для используемого диапазона частот, что свидетельствует о возможности выхода излучения с больших глубин, в том числе при прохождении трассы распространения сигнала через морскую толщу.

Заключение. Подводя итоги, можно утверждать, что интерпретация широкого спектра ЭМИ, регистрируемых на земной поверхности или над ней, основанная на результатах лабораторного опыта и теоретических представлений классической электродинамики в рамках континуальных моделей сред, сопряжена со значительными трудностями, если трасса их распространения к точке регистрации включает и участок, относящийся к земной коре. Известный кри-

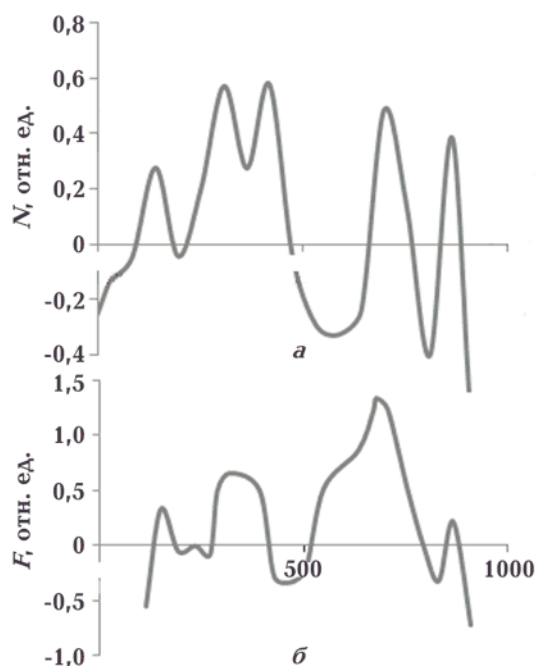


Рис. 6. Изменения интенсивности СЭМИ (а) и величины интегрального индикаторного параметра, отражающего изменения геохимического состава (б).

зис детерминистской парадигмы генерации и распространения ЭМИ литосферного происхождения способствовал появлению иных, отличных от традиционных, взглядов на эту проблему. Сегодня уже общеизвестно, что литосфера эволюционирует по законам и крите-

риям, присущим нелинейным диссипативным открытым системам. Она является активной средой, способной формировать различные (в том числе и хаотичные) пространственно-временные структуры, представляющие собой импульсы и фронты возбуждения. Ей оказалась присуща внутренняя самоподобная структура, определяющая сейсмоэлектромагнитные процессы. Неравновесность, нелинейность, неустойчивость реальной структуры геосреды — основные исходные принципы, на которых должна строиться теория спонтанной электромагнитной эмиссии.

Самый мощный и постоянно действующий источник энергии в геосреде, приводящий в действие механизмы самоорганизации — тепловой поток из земных недр. В соответствии с известной теоремой статистической физики, механизм любой диссипации является одновременно и механизмом рождения флуктуаций.

Напомним, что термином «диссипативная структура» подчеркивается термодинамический аспект проблемы — самоорганизующиеся структуры рождаются и существуют в термодинамически активных системах за счет диссипативных процессов утилизации энергии и энтропии. При этом энергетическая подпитка геосреды способствует формированию активных систем, характеризующихся нелинейной динамикой системы физических полей и автоволновыми механизмами переноса флюидной компоненты.

Геосреда ведет себя подобно набору ре-

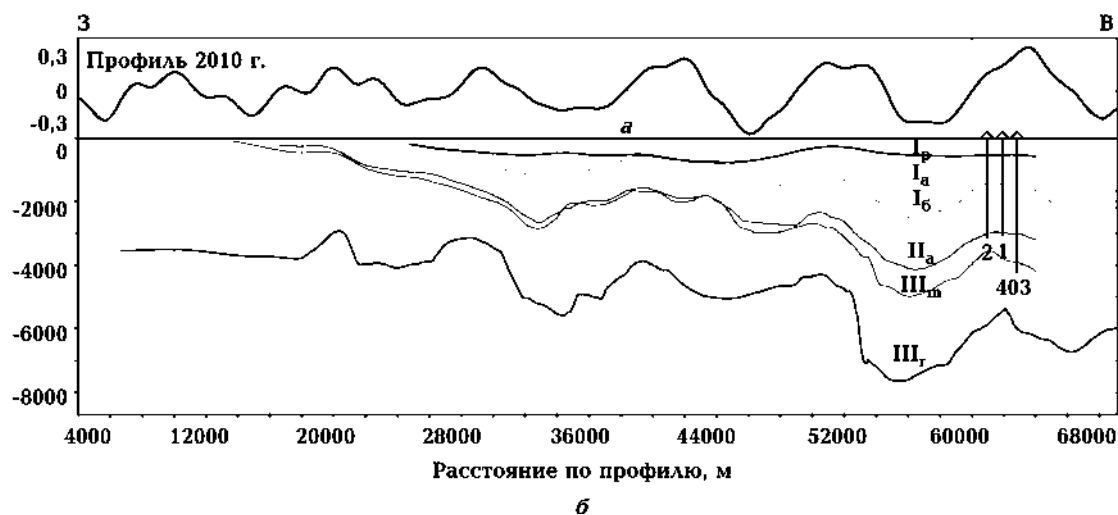


Рис. 7. Субширотный профиль аэрогеофизических наблюдений, пересекающий структуру Субботина на Прикерченском шельфе Черного моря: а — усредненный график распределения исходного сигнала СЭМИ, б — схематический сейсмогеологический разрез [Ночвай та ін., 2003].

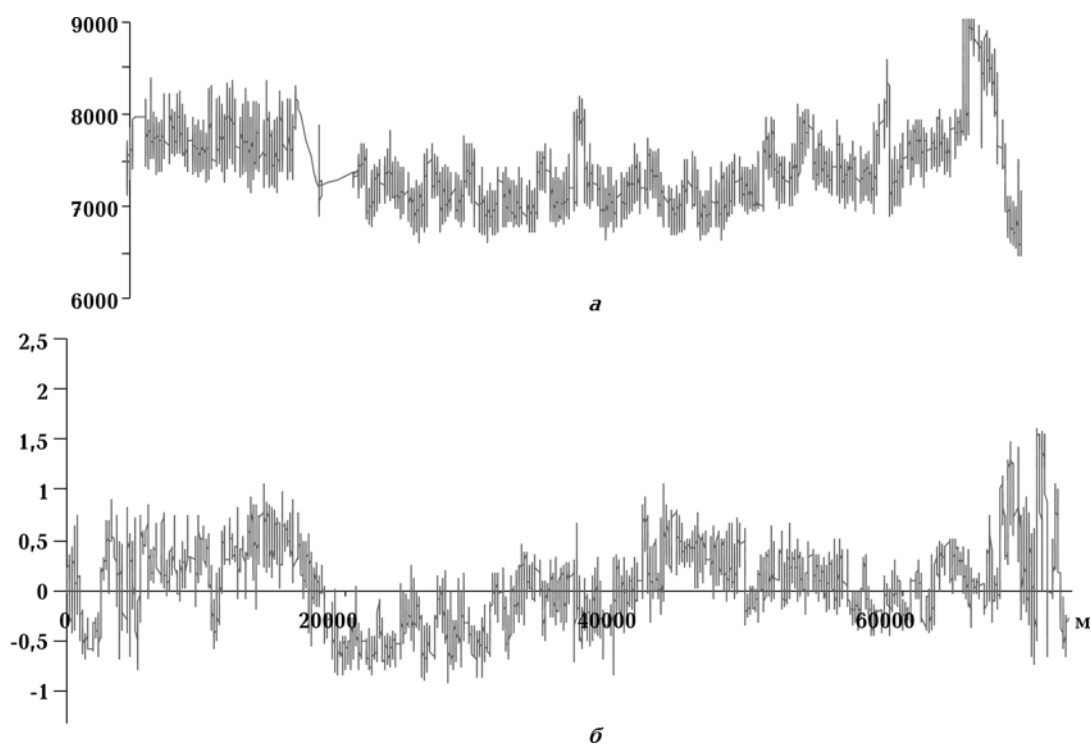


Рис. 8. Графики распределения исходного сигнала СЭМИ, зарегистрированные по профилю в северо-западной части шельфа Черного моря в 2007 г. (а) и в 2010 г. (б) соответственно с борта НИС «Владимир Паршин» [Богданов и др., 2007] и НИС «Профессор Водяницкий» [Коболев, 2011].

зонаторов. В ней формируется некоторое собственное акустосейсмоэлектромагнитное поле, тесно связанное с ее строением и динамикой, эволюционирующее во времени и пространстве. Далее, многочисленные результаты последних лет свидетельствуют о том, что диссипативные твердотельные структуры, самоорганизующиеся в открытых системах, являются фрактальными. В свою очередь, это заставляет отдавать предпочтение блочно-иерархическому (фрактальному) устройству геосреды.

Как известно, фрактальные модели качественно меняют подходы к волновым явлениям. В частности, образование фрактальных агрегатов резко увеличивает мощность генерируемого в них излучения. Тем самым наблюдаемые на земной поверхности вариации спонтанной ЭМИ и других геофизических полей могут интерпретироваться как проявление детерминированного хаоса в иерархически структурированной (фрактальной) геосреде и, вообще говоря, являются продуктом эволюции перколяции.

Таким образом, сейсмоэлектромагнитный шум литосферного происхождения — это уни-

версальный эффект, не требующий специальных условий формирования фрактальных объектов и обусловленный наличием диффузии. Очевидно также, что электродинамика такой самоорганизующейся структуры оказывается тесно связанной с ее механикой, флюидодинамикой и термодинамикой. Следовательно, истолкование результатов метода АСЭМЭЗ, как и его теоретическое обоснование, требуют значительно более детального, чем это принято в методе ЕИЭМПЗ, понимания свойств геосреды и особенностей ее электродинамики. Таким образом, электромагнитное поле, фиксируемое приборами на земной поверхности в рамках МАСЭМЭЗ, соответствует электромагнитным процессам иного типа, нежели тем, что протекают вблизи этой границы раздела. Ясно также, что в общем случае не существует модели геосреды, одинаковой для объяснения всех типов регистрируемых возмущений ЭМИ и соответственно общей для МАСЭМЭЗ и МЕИЭМПЗ. И хотя предпосылки такой идеологии были известны, представленный в работе подход к анализу спонтанной электромагнитной эмиссии, смена парадигмальной методологии исследований

дают возможность получения качественно новой информации о геосреде и происходящих в ней процессах и, в известной степени, способствуют преодолению тенденции замыкания геоэлектрики в кругу собственных проблем. Можно надеяться, что мы являемся свидетелями формирования и становления нового метода геофизической разведки, ориентированного на изучение строения геосреды и геодинамических процессов в ней.

Разумеется, разнообразие специфических ситуаций, природы вариаций ЭМИ, наличие шумов различного происхождения и нестационарности способствуют появлению нескольких

подходов к ее использованию при решении актуальных геолого-геофизических задач и, конечно, требуют дальнейших исследований.

Однако уже сейчас ясно, что эта область исследований и разработок, находящаяся в активной фазе развития, относится к числу тех, которые определяют современный уровень геофизической науки и открывают «фундаментально новый путь исследования земных структур» [Malyshkov et al., 2011]. Именно поэтому необходимо продолжить активное накопление экспериментальных данных и разработку соответствующих методов их истолкования.

Приложение

О классификации электромагнитных сигналов литосферного происхождения

Как свидетельствует обширный эксперимент, наблюдается большое разнообразие электромагнитных возмущений, регистрируемых на земной поверхности или приземной атмосфере в исключительно широком диапазоне частот — от 10^{-4} до 10^6 Гц и выше. Одни из них возбуждаются в атмосфере (грозовые разряды, предгрозовое излучение, непрерывно-шумовое радиоизлучение грозовых облаков, циклонов), другие — в магнитосфере и ионосфере в результате взаимодействия солнечного ветра с геомагнитным полем или проникают в магнитосферу и далее в атмосферу из межпланетной среды, третьи генерируются внутриземными источниками.

Как известно, подавляющая часть энергии электромагнитного поля концентрируется в главном геомагнитном поле Земли, источники которого находятся в земном ядре. В представляющем для нас интересе диапазоне частот наиболее мощные и постоянно функционирующие источники возмущений электромагнитного поля располагаются в ионосфере и магнитосфере. Излучение, генерируемое в геосреде, традиционно связывают с образованием заряженных дислокаций, трещинообразованием, электрокинетическими явлениями, релаксационными и разрядными процессами, пьезоэффектом и др. Однако механизмы преобразования энергии движения горных пород в энергию электромагнитного поля, несмотря на усилия многих исследователей, оказываются весьма сложными, запутанными и неясными.

К настоящему времени нет четкой классификации электромагнитных сигналов литосферного происхождения. Очевидно, наиболее содержательная попытка их классификации принадлежит Т. В. Левшенко и А. В. Гульельми [Левшенко, 1995; Гульельми, 2007]. В соответствии с их схемой, выделено два типа электромагнитных возмущений, генерация которых может происходить как спонтанно, т. е. вне непосредственной связи с проявлением сейсмичности, так и вынужденно, вследствие движения горных пород при сейсмическом воздействии. Сигналы этого типа разделяются на три вида, в зависимости от того, генерируются ли они в очаге сейсмического события, на фронте сейсмической волны или возбуждаются сейсмической волной, достигшей пункта регистрации. При этом каждый из этих трех видов вынужденных сигналов может возбуждаться в результате действия деформационного, индукционного или инерционного механизмов генерации, которые, в свою очередь, подразделяются в зависимости от того, какой тип движения элемента литосферы ответственен за генерацию — вектор перемещений, скорость деформации или ускорение.

С учетом четырех механизмов генерации — индукционного, инерционного, деформационного и пьезомагнитного, А. В. Гульельми предложено достаточно общее линейное уравнение генерации переменного магнитного поля, учитывающего основные элементы механики горных пород — ускорения, деформацию и напряжение. При его выводе предполагалось, что про-

водимость горных пород σ , параметры механомагнитной трансформации, а также сторонние поля \mathbf{E}_0 и \mathbf{V}_0 , присутствующие в среде, однородно распределены в пространстве и не зависят от времени [Гульельми, 2007]. Отмечается, что полученное уравнение генерации следует решать при заданном движении среды. Однако уравнение содержит, по меньшей мере, пять феноменологических параметров, без информации о которых его решение в значительной степени теряет смысл. В столь сложной и неопределенной ситуации, очевидно, кажется более продуктивным классифицировать литосферные сигналы, опираясь на тип постулируемой модели геосреды. Исходя из приведенных в работе мотивов, можно попытаться конкретизировать предложенную В. Т. Левшенко и А. В. Гульельми схему классификации ЛЭМС, представив ее в следующем схематическом виде.

Классификация электромагнитных излучений, регистрируемых на земной поверхности и в приземной атмосфере



<p>лах и горных породах, либо электризация — появление избыточного электрического заряда; в качестве возможной причины поляризации среды рассматривается также пьезоэффект.</p>	<p>та (всплеска) диэлектрической проницаемости на зарядах, ступках зарядов, диполях, содержащихся или возникающих в геосреде при его распространении.</p>
<p>Описание излучения: в виде плоских монохроматических волн, характеризующихся определенными значениями круговой частоты ω и волнового вектора \mathbf{k}. Нормальные волны — все пропорциональные множителю $\exp[i(\mathbf{k}\mathbf{r}-\omega t)]$ решения однородных уравнений Максвелла.</p>	<p>Описание излучения: аналог нормальных волн — автоволны, характеристики которых определяются свойствами среды. Взаимодействуя и координируясь между собой, в неоднородной геосреде они формируют стоячие волны. Использование таких понятий, как «лучевая траектория» или «лучевая оптика», проблематично.</p>
<p>Уравнение генерации [Гульельми, 2007]:</p> $\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \frac{c^2}{4\pi\sigma} \nabla^2 \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) + \nabla \times \mathbf{c}(\mathbf{r}, t),$ <p>где</p> $\mathbf{c} = \alpha \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}_0 + \beta \theta \mathbf{E}_0 + \nabla \times \mathbf{M},$ $\beta = \frac{\partial \ell n \sigma}{\partial \theta}; M_i = (\gamma_1 p_{1i} \delta_i + \gamma_2 P_{ij}) \mathbf{B}_{0j},$ <p>$\lambda, \beta, \gamma_1, \lambda_2$ — параметры механомагнитной трансформации, \mathbf{V} — скорость перемещения горных пород.</p>	<p>Уравнение генерации [Шуман, 2010а, б]:</p> $\frac{\partial B_i(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \alpha_{ij} B_j + F_i(\mathbf{B}),$ <p>где $\alpha_{ij} = c^2 / 4\pi\sigma_{ij}$ — матрица диффузии, $F_i(\mathbf{B})$ — нелинейная функция, определяемая динамичностью процессов в геосреде.</p>
<p>Характерные величины и особенности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – длина волны в случае слабопоглощающей среды; – глубина проникновения в случае наличия поглощения (диффузионное приближение); – обычно используют два диапазона наблюдений [Сурков, 2000]: ОНЧ (VLF) с источниками излучения в приповерхностных слоях земной коры, связанными в основном с микрорастрескиванием пород, и СНЧ (ULF) с источниками, которые находятся в области подготовки очагов сейсмических событий и обусловлены нестационарным течением порового флюида сквозь растрескивающую породу. 	<p>Характерные величины и особенности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – наличие конуса рассеяния; – наличие нетипичных явлений в виде доминантных частот, механизмов переноса энергии колебаний в более низкочастотную или более высокочастотную области; наличие необычной зависимости от структуры геосреды и слабой — от ее электромагнитных параметров разреза; – высокая чувствительность к внешним воздействиям: процессам дегазации земных недр, приливным воздействиям и др.

Список литературы

- Айзенберг-Степаненко М. В., Шер Е. Н. Моделирование волновых явлений в структурированных средах // Физ. мезомеханика. — 2007. — **10**, № 1. — С. 47—57.
- Бессмертный А. Ф., Соломатин В. Н. Решение инженерно-геологических задач на основании результатов наблюдений естественного импульсного электромагнитного поля Земли // Геофиз. журн. — 1999. — **21**, № 1. — С. 119—126.
- 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. — 2009а. — **31**, № 4. — С. 34—43.
- Богданов Ю. А., Коболев В. П., Русаков О. М., Захаров И. Г. Геополяритонное зондирование га-
зоносных 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. — 2009б. — **31**, № 4. — С. 20—33.
- Болотов В. Н. Обобщенная функция Кантора и переходное фрактальное рассеяние // Журн. техн. физики. — 2002. — **72**, вып. 2. — С. 8—15.
- 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 Е. А., Дорофеев И. А. Термостимулированные электромагнитные поля твердых

- тел // Успехи физ. наук. — 2009. — **179**, № 5. — С. 449—485.
- Вол А., Гилат А. Первичные водород и гелий как источники энергии землетрясений // Генезис углеводородных флюидов и месторождений. — Москва: ГЕОС, 2006. — С. 160—166.
- Воробьев А. А. О возможности возникновения электрических разрядов в недрах Земли // Геология и геофизика — 1970. — № 12. — С. 3—13.
- Воробьев А. А. Равновесие и преобразование видов энергии в недрах. — Томск: Изд-во Томского ун-та, 1980. — 211 с.
- 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.
- Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Похотелов О. А. Сейсмoeлектромагнитные явления. — Москва: Наука, 1988. — 174 с.
- Гульельми А. В. Инерционные эффекты в коре и магнитосфере Земли // Физика Земли. — 2006. — № 1. — С. 50—56.
- 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.
- 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.
- Дубровский В. А., Сергеев В. Н. Кратко- и среднесрочные предвестники землетрясений как проявление нестабильности скольжения вдоль разломов // Физика Земли. — 2006. — № 10. — С. 11—18.
- Дурандин А. В. Структурно-тектонический анализ данных дистанционного зондирования Земли // Геомастика (Geomatics). — 2011. — № 1. — С. 48—51.
- Золотухин И. В., Калинин Ю. Е., Логинова В. И. Твердотельные фрактальные структуры // Альтернативная энергетика и экология. — 2005. — № 9 (29). — С. 56—66.
- Зосимов В. В., Ляшев 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—531.
- 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.
- Кузнецов С. П. Динамический хаос и однородно-гиперболические аттракторы: от математики к физике // Успехи физ. наук. — 2011. — **181**, № 2. — С. 121—148.
- Левшенко В. Т. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы литосферного происхождения: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Москва: ОНФЗ РАН, 1995. — 36 с.
- Николаев А. В. Развитие методов нелинейной геофизики // Электронный научно-информац. журн. «Вестник ОГПГГ РАН», ОНФЗ РАН. — 2002. — № 1 (20).
- Ночвай М. В., Маркова Г. Г., Гірняк Л. І. Звіт про пошукові і сейсмозвідувальні роботи МВХ СГТ на Керченському шельфі Чорного моря в 2001—2003 рр. (титул 406). — Київ: ДГП «Укргеофізика», 2003. — 96 с.
- 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. Избранные труды. — Москва: Наука, 2004. — 440 с.
- Саговский М. А., Писаренко В. Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. — Москва: Наука, 1991. — 96 с.
- Спивак А. А., Кишкина С. Б. Исследование микросейсмического фона с целью определения активных тектонических структур и геодинамических характеристик среды // Физика Земли. — 2004. — № 7. — С. 35—49.
- 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., Руса-

- ков О. М., Орлюк М. И, Шуман В. Н., Омельченко 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., Куприенко 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.
- Сурков В. В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. — Москва: Изд. Моск. инж.-физ. ин-та, 2000. — 235 с.
- 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.
- Чебан В. Д. Метод природного импульсного электромагнитного поля Земли. Деякі аспекти застосування // Геофиз. журн. — 2001. — **23**, № 4. — С. 112—121.
- Шуман В. Н. Геосреда и сейсмический процесс: проблемы управления // Геофиз. журн. — 2011. — **33**, № 2. — С. 16—27.
- Шуман В. Н. Концепция динамически неустойчивой геосреды и сейсмoeлектромагнитный шум литосферы // Геофиз. журн. — 2010б. — **32**, № 6. — С. 101—118.
- Шуман В. Н. Электродинамика геосреды и методы геоэлектрики // Геофиз. журн. — 2010а. — **32**, № 2. — С. 28—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. Электродинамика фрактальных сред, переходное фрактальное рассеяние и электромагнитный шум литосферы // Геофиз. журн. — 2012а. — **34**, № 1. — С. 3—13.
- Шуман В. Н. Электромагнитная эмиссия литосферы: всегда ли мы адекватно трактуем то, о чем как будто знаем? // Геофиз. журн. — 2012б. — **34**, № 2. — С. 4—19.
- 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., 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 Sci. Publish. Company, 1999. — 996 p.
- Gershenson N., Vambakidis G. Modeling of seismoelectromagnetic phenomena* // Rus. J. Earth Sci. — 2001. — **3**, № 4. — P. 247—275.
- Gufeld I. L., Matveeva M. I., Novoselov O. N. Why we cannot predict strong earthquakes in the Earth's crust* // Geodynamics and Tectonophysics. — 2011. — **2**, № 4. — P. 378—415. — DOI:10.5800/GT2011240051.
- Malyshkov S. Yu., Malyshkov Yu. P., Gordeev V. F., Shtalin S. G., Polivach V. J., Bazhanov Y. Y., Hanan T.* Cornell University Library, arhiv.org /Pdf/ 11.02.0125. Submitted on 1 Feb. 2011.