

## Спонтанное электромагнитное излучение на акваториях: новый эксперимент и приложения

© В. Н. Шуман<sup>1</sup>, В. П. Коболев<sup>1</sup>, Ю. А. Богданов<sup>2</sup>, И. Г. Захаров<sup>2</sup>,  
Д. А. Яцюта<sup>2</sup>, 2011

<sup>1</sup>Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

<sup>2</sup>ООО «Юг-нефтегазгеология», Киев, Украина

Поступила 4 февраля 2011 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

Наведено нові експериментальні дані щодо реєстрації електромагнітного випромінювання радіохвильового (кілогерцового) діапазону на акваторії Чорного та Азовського морів. Обговорено актуальну проблему співвідношення теорії та експерименту під час дослідження процесів генерації та поширення сейсмоакустоелектромагнітних збуджень у літосфері, їх трансформації та взаємодії в системі літосфера—морське середовище—атмосфера, винесення їх електромагнітної компоненти на земну поверхню і в атмосферу. Увагу зосереджено на фізичних механізмах сейсмоакустогідроелектромагнітних перетворень та інформаційних можливостях методу з вивчення структури геосередовища та геодинамічних процесів у ньому під морським дном.

New experimental data on registration of electromagnetic emission in radio-wave (kilohertz) range obtained on water areas of the Black Sea and the Sea-of-Azov have been given. The actual problem is being discussed on relation of theory and experiment during the studies of the processes of generation and distribution of seismo-acoustic-electromagnetic disturbances in lithosphere, their transformation in the system lithosphere- marine medium-atmosphere, their electromagnetic component removal to the day surface and into the atmosphere. The attention is concentrated on the physical mechanisms of seismic-acoustic-hydro-electromagnetic transformations and informational possibilities of the method for the studies of the structure of geomedium and dynamic processes under the sea bottom.

**Введение.** Сейсмические шумы различной природы в широком диапазоне частот (эндогенные и экзогенные), сверхнизкочастотное электромагнитное излучение уже достаточно давно стали привычным рабочим инструментом для исследователей в различных областях геофизики [Гохберг и др., 1988; Сурков, 2000; Gershenson, Vambakidis, 2001; Садовский, 2004; Гульельми, 2007; Гуфельд, 2007; Шуман, 2010]. К сейсмическим шумовым полям обычно относят колебания элементов земной коры в диапазоне периодов от сейсмоакустических (менее  $10^{-3}$  с) до микросейсмических ( $1-10^{-3}$  с и выше). Промежуточный диапазон относится к высокочастотному сейсмическому шуму ( $10^{-1}-10^{-3}$  с) [Гуфельд и др., 2008]. Что касается электромагнитного излучения, регистрируемого на земной поверхности или в атмосфере над ней, то его диапазон весьма широк — от  $10^{-4}$  до  $10^6$  Гц и выше. Причем в области радиочастот 1—100 кГц оно имеет импульсный характер, а низкочастотные поля по своей морфологии

существенно отличаются от высокочастотных [Сурков, 2000; Гульельми, 2007].

Традиционно внимание исследователей в большей мере уделялось ультранизкочастотным электромагнитным волнам в диапазоне периодов 0,2—600 с [Гульельми, 2007]. Было установлено большое разнообразие волн этого типа, возбуждаемых вне- и внутриземными источниками. Некоторые электромагнитные волны проникают в магнитосферу Земли из межпланетной среды, другие возбуждаются в ней в результате взаимодействия солнечного ветра с геомагнитным полем. Регистрируются электромагнитные колебания этого диапазона, сопутствующие распространению сейсмических и морских волн.

Накоплен обширный объем экспериментальных данных по характеристикам сейсмических шумов в широком диапазоне периодов. Его структура оказалась также существенно неоднородной. В нем присутствуют микроколебания различного происхождения: наряду с

фоновыми микроколебаниями отчетливо выделяются импульсные события разного энергетического класса [Спивак, Кишкина, 2004]. Эксперимент свидетельствует о существенном отличии высокочастотного сейсмического шума как от чисто случайного (бесконечномодового), так и от чисто детерминированного процесса [Мухамедов, 1992]. Продолжается бурный рост числа публикаций, посвященных вопросам генерации и распространения как электромагнитных возмущений различной природы, так и сейсмических шумовых полей. Тем не менее, ряд концептуальных вопросов физики процессов, которые, вообще говоря, были поставлены и сформулированы еще во время становления этого направления исследований, до сих пор нельзя считать окончательно решенными. Здесь мы встречаемся с ситуацией, когда явления, являющиеся по мнению многих исследователей невозможными, обнаруживаются в эксперименте [Богданов и др., 2009б; Ершов и др., 2010а; Паламарчук, Кирейтов, 2010; Шуман, 2010]. В частности, вызывают непонимание, встречаются с серьезными затруднениями и продолжают активно обсуждаться вопросы, относящиеся к механизмам механоэлектромагнитных преобразований в геосреде, генерации электромагнитного излучения и его выхода на дневную поверхность и в атмосферу, ряд аспектов физических моделей связи в системе литосфера—атмосфера—ионосфера и др.

Ситуация еще больше усугубляется при исследованиях на акваториях, когда трасса распространения излучения включает участок, относящийся к хорошо проводящему слою морской воды. Здесь представляется правомерной постановка двух вопросов. Первый — можно ли получить информацию о строении литосферы и геодинамических процессах в ней под дном океана или моря, регистрируя электромагнитное излучение отмеченного ранее диапазона на поверхности воды или даже в атмосфере? Второй — как эти возмущения (сигналы) проявляются и о чем свидетельствует натуральный эксперимент, если такой имеется?

Несомненно, эти вопросы имеют определяющее, фундаментальное значение при постановке исследований на акваториях. Действительно, если неясны механизмы генерации электромагнитного излучения и его выноса на поверхность водной среды и в атмосферу, остается открытым вопрос об информационном содержании этих сигналов, в частности о глубинной привязке источников излучения. К со-

жалению, вынуждены отметить, что, несмотря на новые экспериментальные и теоретические результаты, полученные в последнее время, нельзя утверждать, будто на этом пути исследований достигнут существенный прогресс. И это вполне понятно: для конструктивной работы, как известно, необходимо ограничиваться точно сформулированными «физическими» задачами. Разумеется, при этом речь не может идти о спекуляциях, игнорирующих общепризнанное содержание физики, в частности, классической электродинамики. Исходя из этой, очевидно, не очень спорной концепции, предпримем попытку дальнейшего развития методики интерпретации результатов измерений электромагнитной эмиссии на акваториях, выполненных в последнее время. При этом, следуя работам [Гуфельд, 2007; Генштафт, 2009; Богданов и др., 2009б, в; Шуман, 2010], примем, что неравновесность, нелинейность, неустойчивость геосреды являются основными исходными предпосылками, на которых должна строиться теория генерации спонтанного электромагнитного излучения (СЭМИ).

Существенно, что нелинейность предполагает как «самовоздействие», так и взаимодействие процессов различной природы, причем воздействия могут быть сейсмические, акустические, электромагнитные, деформационные и прочие, охватывающие связями как геофизические поля, так и процессы, протекающие в земных недрах. С этой точки зрения сейсмоакустическая и электромагнитная эмиссии являются характерным и естественным свойством геосреды как открытой диссипативной системы [Садовский, 2004; Гуфельд, 2007; Генштафт, 2009].

**Некоторые результаты измерений СЭМИ на акваториях Черного и Азовского морей.** На базе современных достижений в сборе, обработке и анализе геофизической информации в ООО «Юг-нефтегазгеология» разработана экспресс-технология исследования геологического строения и поисков месторождений полезных ископаемых методом анализа спонтанного импульсного электромагнитного излучения [Богданов и др., 2009а, б и др.]. В последние годы с помощью этой технологии выполнен достаточно большой объем экспериментальных исследований по регистрации СЭМИ с использованием в качестве носителя измерительной аппаратуры водные и воздушные виды транспорта. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о высокой разрешающей способности метода анализа

СЭМИ [Богданов и др., 2007; Старостенко и др., 2009 и др.].

Для регистрации электромагнитного излучения используется измерительный комплекс «Астрогон», включающий регистратор, приемник GPS и интерфейсный адаптер, обеспечивающие высокую технологичность и автономность проведения измерений [Богданов и др., 2009a]. Регистратор измеряет интенсивность импульсного потока, отображающий количество импульсов электромагнитного излучения в единицу времени (обычно 1 с) с амплитудой выше заданного порога (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 магнитного поля в диапазоне частот 1,5—70 кГц (по уровню 3 дБ).

Для стационарного случайного процесса, обладающего эргодическим свойством, как известно, существует связь числа пересечений заданного уровня со средней мощностью и среднеквадратическим значением частоты спектральной плотности этого процесса. Измерение числа импульсов имеет определенные преимущества перед измерением интенсивности сигнала (его огибающей) вследствие своей простоты реализации. Такой подход более чувствителен к изменению количества излучателей в геосреде.

Заметим, что число излучателей СЭМИ и их мозаичное распределение, вообще говоря, не будет совпадать с мозаикой напряжений в геосреде, а будет определяться как механическими свойствами горных пород, так и коэффициентами механоэлектромагнитных преобразований. В то же время необходимо учитывать, что, ограничиваясь регистрацией только потока импульсов, не удастся идентифицировать реальный вид высокочастотного сигнала. Это не позволяет исследовать его частотный диапазон, затрудняет изучение механизмов его генерации и локализацию источника, сопоставление с данными лабораторного моделирования. К сожалению, имеющиеся сведения о спектре с СЭМИ весьма скудны. Возможно, его спектральный состав не стабилен и определяется совокупностью факторов.

Остановимся на некоторых характерных примерах по регистрации СЭМИ на профилях, при переходе суша — море. На рис. 1 приведены графики активности электромагнитного излучения, полученные с помощью летательного аппарата в 2009 г. по трем параллельным

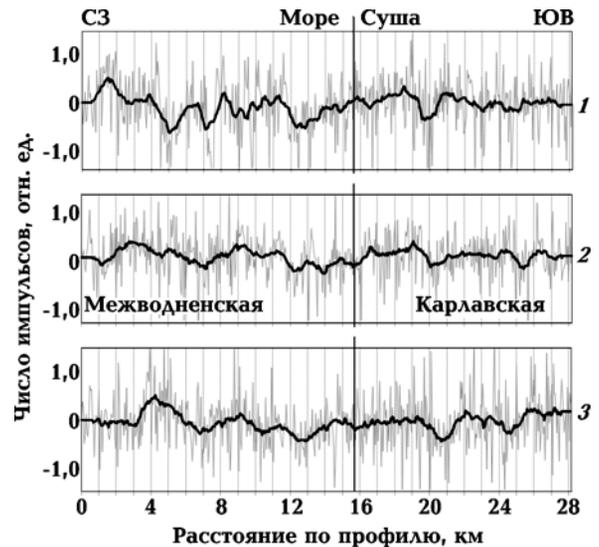


Рис. 1. Графики распределения исходного сигнала СЭМИ, зарегистрированные с летательного аппарата по трем параллельным профилям, пересекающим береговую линию Тарханкутского полуострова (северо-западная часть Черноморского бассейна).

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.

Изменение неоднородности поля СЭМИ вдоль линии профиля, пересекающего в широтном направлении структуру Субботина на Прикерченском шельфе Черного моря (глубина моря 50—60 м), приведен на рис. 2. Усреднение данных всех наблюдений при полетах в полосе порядка  $\pm 600$  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 ха-

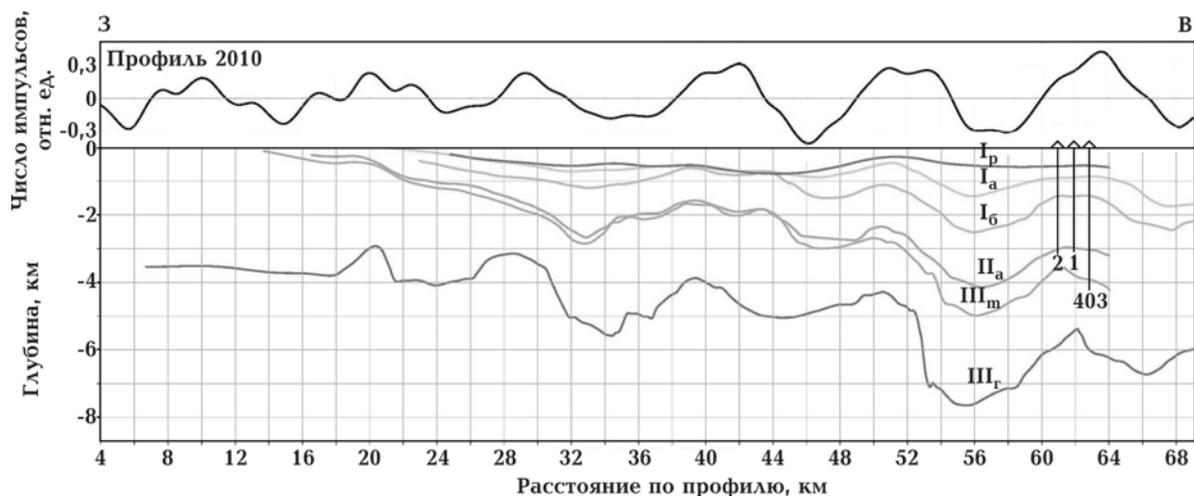


Рис. 2. Субширотный профиль аэрогеофизических наблюдений, пересекающий структуру Субботина на Прикерченском шельфе Черного моря. Вверху — усредненный график распределения исходного сигнала СЭМИ, внизу схематический сейсмогеологический разрез [Ночвай та ін., 2003].

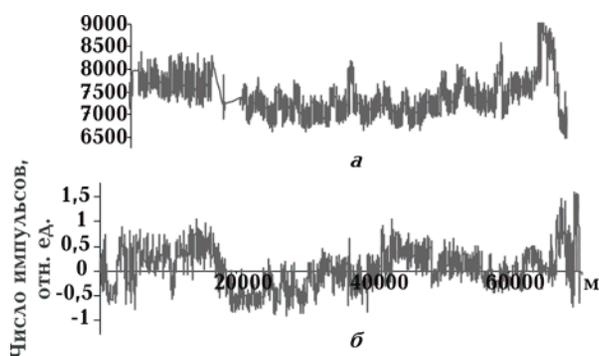


Рис. 3. Графики распределения исходного сигнала СЭМИ, зарегистрированные по профилю в северо-западной части шельфа Черного моря в 2007 г. (а) и в 2010 г. (б) соответственно с борта НИС «Владимир Паршин» [Богданов и др., 2007] и НИС «Профессор Водяницкий» [Коболев, 2011].

рактически изменения исходного сигнала СЭМИ во временном масштабе. На рис. 3 показано изменение интенсивности активности электромагнитного излучения вдоль профиля в северо-западной части Черного моря, зарегистрированные в 2007 и в 2010 гг. соответственно с борта НИС «Владимир Паршин» [Богданов и др., 2007] и «Профессор Водяницкий» [Коболев, 2011].

На рис. 4 приведены записи исходного сигнала по двум параллельным профилям профиля DOBRE, пересекающего с севера на юг Азовское море, Керченский полуостров и Черноморский шельф (рис. 5). Расстояние между профилями составляет 5 км. В целом следует

отметить достаточно высокое сходство полученных записей. Локальные различия в исходном сигнале могут быть обусловлены различием геологического строения двух профилей.

Важные методические выводы, вытекающие из приведенных экспериментальных наблюдений СЭМИ вдоль протяженных профилей, могут быть сведены к следующим положениям:

- в составе регистрируемого сигнала на уровне моря и выше над ним значительную долю составляют импульсы литосферного происхождения;

- распределение интенсивности СЭМИ обладает упорядоченной структурой, тесно связанной со строением и динамикой геосреды.

Иначе говоря, на акваториях стабильно выделяются аномалии СЭМИ в диапазоне частот 1,5–70 кГц, приуроченные к определенным особенностям разреза — разломным зонам, неоднородностям геосреды. Эти выводы подтверждаются экспериментальными данными, полученными другими авторами в других регионах [Паламарчук, Кирейтов, 2010]. В итоге создается впечатление, что СЭМИ как бы проходит сквозь толщу хорошо проводящей морской воды, отражая строение и динамику геосреды под ней, что, вообще говоря, казалось бы противоречит здравому смыслу и классической электродинамической теории. Парадоксальность ситуации, во всяком случае, очевидна: явления, по устоявшимся представлениям относящиеся к сомнительным или невозможным, обнаруживаются в эксперименте!

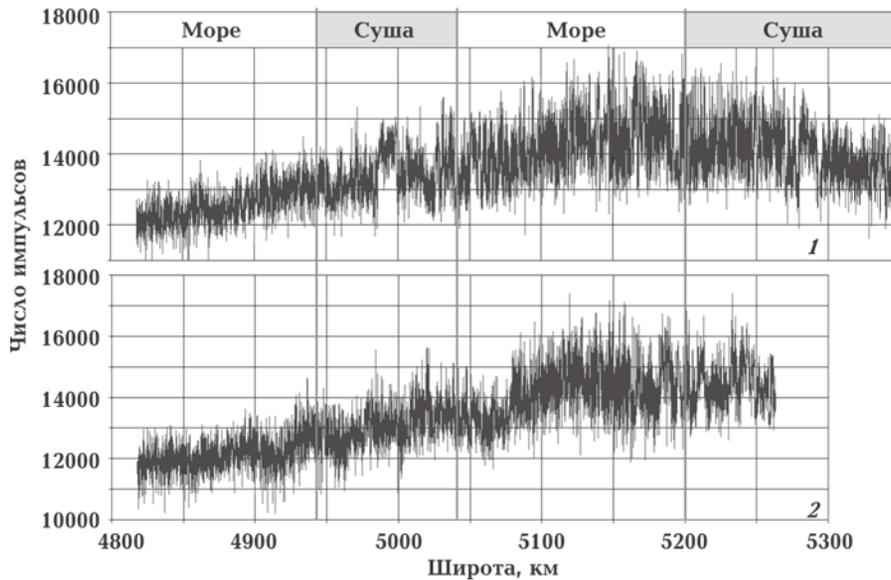


Рис. 4. Записи исходного сигнала по двум параллельным профилям профиля DOBRE.

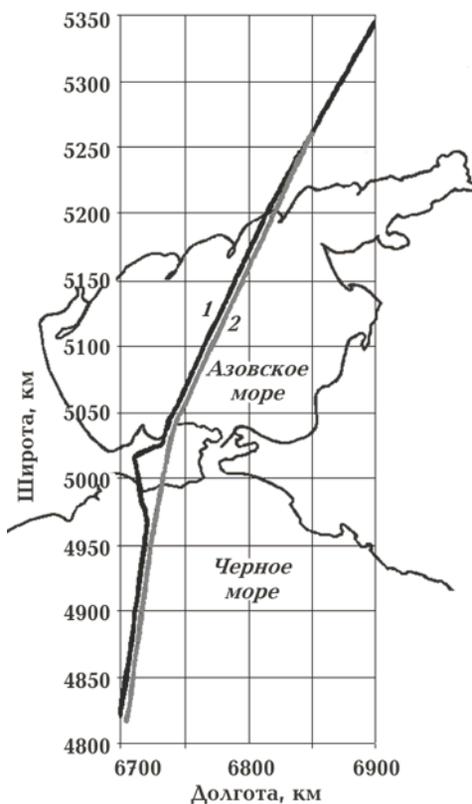


Рис. 5. Расположение профилей аэроэлектромагнитных наблюдений на южном окончании профиля DOBRE.

Объяснению этого феномена, его авторской трактовке, ориентированной на геофизические приложения, посвятим дальнейшее изложение, хотя, возможно, на современном уровне экс-

перимента и теоретических представлений все еще крайне затруднительно дать его систематическое количественное описание.

**О модели геосреды.** Приведем некоторые общие сведения, касающиеся модели геосреды, важные для дальнейшего рассмотрения.

Как уже упоминалось, геосреда, являясь достаточно специфическим объектом исследований, не может рассматриваться как пассивный континуум. Ей присуща внутренняя самоподобная структура, в которой нет места для какой-либо области с характерными размерами и границами, как не существует и какого-либо характерного масштаба. Учение о геосреде появилось как результат обобщения многолетних экспериментальных исследований физических свойств горных пород в их исключительно широком петрофизическом и фациальном разнообразии масштабов, физических характеристик и термодинамических условий [Николаев, 2002; Садовский, 2004; Стаховский, 2007; Гуфельд, 2007; Гендшафт, 2009]. Его основные положения сводятся к следующим:

- иерархическая неоднородность геосреды, «кусковатость» во всем диапазоне масштабов;
- ярко выраженная физическая нелинейность, проявляющаяся во взаимосвязях физических характеристик, полей и процессов;
- способность постоянно (спонтанно) излучать энергию в форме сейсмоакустической, тепловой и электромагнитной эмиссий;
- быстрая изменчивость ее параметров во времени под действием разнообразных вну-

тренних и внешних сил как следствие активности и нелинейности различной природы — физической, геометрической, структурной [Руденко, 2006].

При этом под внешними силами (полями) подразумевается эволюция приливных деформаций в системе Земля—Луна—Солнце, а под внутренними — широкий спектр физико-химических процессов в системе ядро—мантия—литосфера, включая эффекты взаимодействия восходящих флюидных потоков (в частности, потоков легких газов — водорода, гелия и др.) с твердой фазой литосферы [Гуфельд, 2007].

Как известно, глубинный флюид представляет собой сложную открытую энергетически насыщенную динамическую систему, постоянно меняющую состав и свойства. Скорость его перемещения зависит от энергетических особенностей геосистемы и внешних условий. В итоге в условиях взаимодействия с непрерывным и переменным потоком восходящих легких газов твердая фаза геосреды испытывает макроскопические деформационные эффекты, что в конечном итоге ведет к несинхронным вариациям его объемно-напряженного состояния. Энергетическая подкачка такой среды способствует формированию активных систем, характеризующихся нелинейной динамикой комплекса физических полей и автоволновыми механизмами переноса флюидов [Дмитриевский, 2008]. В итоге при описании взаимосвязанных механических, тепловых, диффузионных и электромагнитных процессов в геосреде основными являются уравнения баланса энергии, количества движения, энтропии, заряда, массы и уравнения Максвелла.

Иерархическая неоднородность геосреды определяет возникновение сильных концентраций полей на малых дефектах структуры и наряду с наличием в ней компонент с резко контрастирующими линейными упругими свойствами объясняет сильную нелинейность физических свойств горных пород, проявляющихся при распространении слабых возмущений — деформационных, сейсмических, электромагнитных.

Очевидно, в рамках таких представлений природная среда, стремящаяся к самоорганизации, нуждается в новых моделях описания, которые бы позволили анализировать диссипацию поступающей в нее энергии из земных недр, релаксацию локальных напряжений, стационарные режимы деформирования, вопросы генерации и распространения акусто-сейсмоэлектромагнитных возмущений.

Существенно, что эволюция нелинейных систем может осуществляться разными путями. На смену однозначности приходит множественность путей развития, многообразие поведения ее объектов, а ограниченная точность в описании системы имеет принципиальное значение. Отличительные признаки таких систем — необратимые изменения во времени, фрактальность, недетерминированность поведения после прохождения критической точки (бифуркации), волновая (автоволновая) и резонансная природа протекающих в ней процессов, большая (а иногда и определяющая) роль малых возмущений [Гуфельд, 2007].

Представления о критических явлениях в открытых нелинейных системах позволяют с иных позиций подойти к проблеме возможных источников и прогноза сейсмической активности [Лукк и др., 1996; Гуфельд, 2007; Геншафт, 2009 и др.]. В частности, в работе [Дещерский и др., 2003] обосновывается возможность извлечения прогнозной информации о динамике эндогенных процессов из хаотических высокочастотных вариаций геофизических параметров, а авторы [Соболев, Пономарева, 2003] вплотную подошли к трактовке тектонического процесса как детерминированного хаоса, ведущего к самоорганизации. При этом активность геосреды порождает интенсивное взаимодействие эмиссионных и внешних полей, причем и сейсмичность, и сейсмоакустическая и электромагнитная эмиссии являются проявлением метастабильного состояния вещества земных недр и обладают высокой чувствительностью к внешним воздействиям [Николаев, 2002].

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

Очевидно, назрела необходимость постановки детальных исследований иерархических свойств как акустосейсмической эмиссии, так и связанного с ней электромагнитного излучения. С этой точки зрения представляется также обоснованным противопоставлять или разграничивать сейсмическую, сейсмоакустическую и электромагнитную составляющие излучения.

Заметим, что успех в применении фрактальных моделей в геофизике обусловлен, прежде всего, тем, что фрактальные формы присущи огромному числу процессов и структур, хотя, к сожалению, они далеко не всегда поддаются аналитическому исследованию.

**Источники и механизмы распространения электромагнитного шума.** Как свидетельствует обширный эксперимент, источники электромагнитных возмущений, регистрируемых на земной поверхности или над нею, в очень широком диапазоне частот от  $10^{-4}$  до  $10^6$  Гц и выше имеют как атмосферно-ионосферно-магнитосферное, так и литосферное происхождение [Сурков, 2000; Gershenson, Bambakidis, 2001; Гульельми, 2007; Богданов, 2008; Богданов и др., 2009б; Шуман, 2010]. При этом наиболее мощные и постоянно действующие источники электромагнитных возмущений превосходят по плотности потока на несколько порядков другие типы естественных излучений — ультранизкочастотные (ultralow-frequency, по западной терминологии) пульсации геомагнитного поля в диапазоне периодов 0,2—600 с.

Магнитогидродинамические (МГД) волны естественного происхождения интересны во многих отношениях. С практической точки зрения они представляют интерес для исследования плазменных и волновых явлений в околоземном пространстве (диагностики околоземной среды), изучения структуры земной коры и геодинамических процессов в ней. По мнению многих авторов, ультранизкочастотный диапазон является наиболее перспективным для поиска электромагнитных шумов литосферного происхождения, связанных с процессами подготовки сейсмических событий. К числу наиболее интересных явлений в ионосфере в связи с подготовкой сейсмических событий на различных фазах относятся «аномальные» всплески электромагнитного излучения в диапазоне частот от единиц Гц до десятков кГц, зарегистрированные на спутниках: «аномальные» квазипостоянные электрические поля в ионосфере; «аномальные» магнитные пульсации; «аномальные» возмущения в ионосфере [Липеровский, 2006].

По спутниковым измерениям также обнаружено, что каждый тип структуры литосферы характеризуется особым характером низкочастотного излучения в диапазоне периодов 0,1—20 кГц [Ларина и др., 2001].

Что касается источников электромагнитного излучения в атмосфере, то ими могут быть: грозовые разряды, предгрозовое излучение,

непрерывно-шумовое радиоизлучение грозовых облаков, а также циклоны (частоты от кГц до сотен МГц). Полагают, что физическая природа двух последних видов излучения обусловлена колебаниями поверхностей заряженных капель воды или их дроблением и коагуляцией.

Излучают радиоволны и различные светящиеся объекты, возникающие в атмосфере и имеющие, скорее всего, плазменное происхождение. Очевидно, существует также и излучение космического происхождения [Гульельми, 2007]. Следует указать на наличие электромагнитных возмущений, связанных с деятельностью человека — индустриальными помехами разного рода.

Сосредоточимся на электромагнитном излучении литосферной природы. Как свидетельствует эксперимент, генерация электромагнитных возмущений в литосфере может осуществляться как спонтанно, т. е. вне прямой связи с проявлением сейсмичности, так и вынужденно, вследствие движения горных пород при сейсмическом воздействии [Левшенко, 1995]. Но если путь изучения вынужденных сигналов литосферы более определен, то теоретические подходы к анализу спонтанных литосферных сигналов менее разработаны и более неопределенны [Левшенко, 1995; Гульельми, 2007].

Вынужденные электромагнитные сигналы литосферы подразделяют на три типа в зависимости от того, приходят ли они от сейсмического очага к пункту регистрации с фронтом сейсмической волны или возбуждаются сейсмической волной, достигшей пункта наблюдения [Левшенко, 1995; Гульельми, 2007]. Соответствующие механизмы генерации — деформационный, индукционный и инерционный — выделяются в зависимости от того, какой тип движения элемента геосреды ответствен за генерацию: вектор перемещений, скорость деформации или ускорение [Левшенко, 1995; Гульельми, 2007].

Что касается спонтанных литосферных сигналов, то их обычно связывают с трещинообразованием, движением флюидов, резонансными явлениями на неоднородностях [Левшенко, 1995]. При этом в неоднородных средах эффекты образования локальных электрических полей и зарядов возникают на разных структурных уровнях.

Во-первых, на атомном уровне, внутри отдельных монокристаллов и зерен, слагающих горную породу, вследствие перемещения дислокаций и точечных дефектов атомных решеток [Богданов, Павлович, 2008].

Во-вторых, на микроскопическом уровне вблизи границ зерен, микротрещин, мелких включений и пустот.

Эффект проявляется и в макроскопическом масштабе, когда поляризационные процессы разделения зарядов локализуются вблизи вершин крупных трещин и отдельных блоков [Сурков, 2000].

Если же говорить об их временных и спектральных характеристиках, то они определяются динамикой роста трещин, процессами изменения их концентрации в зоне разрушения, а также, возможно, эффектами дилатансии в разрушенной породе. Исследования обычно концентрируются в трех направлениях:

- лабораторном изучении электромагнитных явлений, обусловленных деформацией и разрушением образцов горных пород и минералов;
- исследования излучения в условиях естественного залегания горных пород и, наконец,
- исследования в аспекте сейсмических событий.

При этом анализируемый спектр явлений последовательно рассматривается для однородных, неоднородных, анизотропных и фрактальных сред [Сурков, 2000].

Разумеется, все механизмы генерации электромагнитных возмущений — и литосферного, и атмосферно-магнитосферного типа — вносят вклад в результаты полевых измерений на дневной поверхности, если частота излучений лежит в области (окне) прозрачности для электромагнитных волн. Следует отметить, что детальное знание морфологии и механизмов генерации электромагнитных возмущений позволяет выделять слабоаномальные возмущения, связанные с источниками неионосферно-магнитосферной природы. Однако обычно методика выделения литосферного сигнала основывается на использовании однородности поля геомагнитных пульсаций внешнего происхождения и грозовых разрядов по площади. Так, горизонтальные градиенты поля магнитосферных волн (не превышающие нескольких единиц пикотесла на километр) много меньше горизонтальных градиентов сигналов литосферного происхождения. Что касается низкочастотных компонент спектра грозовых разрядов, представляющих собой плоские неоднородные вертикально поляризованные электромагнитные волны, то они распространяются в сферическом волноводе, ограниченном поверхностью Земли и ионосферой с очень малым затуханием, не превышающим единиц децибел на тысячу километров. Таким образом, для сигналов, которые будем в

дальнейшем считать помехой, характерна высокая однородность магнитной компоненты поля на значительной площади наблюдений.

Ситуация с сигналами литосферного происхождения существенно иная. Оценки показывают, что для трассы распространения в среде с удельной проводимостью  $\sigma$  в диапазоне  $10^{-1}$ — $10^{-3}$  См/м, характерном для пород земной коры в условиях их естественного залегания, на частотах  $10^4$ — $10^6$  Гц коэффициент затухания

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\varepsilon}{2}} \sqrt{-1 + \sqrt{1 + (60\sigma\lambda/\varepsilon)^2}},$$

где  $60\sigma\lambda/\varepsilon = \sigma/\omega\varepsilon$  имеет смысл отношения плотности токов проводимости к плотности токов смещения,  $\lambda$  — длина волны в среде,  $\varepsilon$  — ее диэлектрическая проницаемость,  $\omega$  — круговая частота, превышает  $10^2$ — $10^3$  Дб/км [Гохберг и др., 1985].

Напомним в этой связи, что полное поглощение излучения происходит при затухании — 120 дБ.

Следовательно, с классической точки зрения радиоизлучение на частотах в десятки и сотни кГц или МГц не может выходить на поверхность из глубинных очагов или зон его генерации, что, вообще говоря, противоречит данным эксперимента [Богданов и др., 2009]. В поверхностном же слое мощностью 10—150 м весьма проблематично найти достаточное количество источников радиоизлучения и еще труднее связать его с формирующимся сейсмическим очагом или динамическими процессами на глубине [Сурков, 2000].

Очевидно, ни о каком распространении электромагнитного излучения этого диапазона из глубинных зон литосферы и тем более через толщу морской воды, являющейся хорошим проводником, казалось бы, речи быть не может. Но что делать с экспериментальными наблюдениями на акваториях, однозначно свидетельствующих, как уже упоминалось, о его присутствии на поверхности водной среды и в атмосфере над ней?

С точки зрения классической электродинамики возможности дальнего или даже «сверхдальнего» распространения сигналов этого частотного диапазона на расстояния, значительно превосходящие мощность скин-слоя, в принципе может быть объяснена двумя причинами [Шуман, Богданов, 2008]:

во-первых, это наличие в среде распространения немонотонной зависимости фазовой скорости волны от поперечных к направле-

нию распространения координат (например, глубины);

во-вторых, это возможность раскрытия «промежуточного дисперсионного окна», в частотном интервале которого электромагнитные импульсы могут распространяться практически без существенных искажений. При этом амплитуда импульса относительно слабо зависит от проводимости среды распространения, если ширина его спектра не превышает ширины «промежуточного окна», появление которого в среде с дисперсией связано с аномальным ростом значений относительной диэлектрической проницаемости, установленным экспериментально на некоторых образцах горных пород на частотах ниже 25 МГц [Шуман, Причепий, 2004]. Этот аномальный рост на 3—4 порядка существенно меняет соотношение между токами проводимости и поляризационными токами, выполняющими роль токов смещения в среде с дисперсией на этих частотах. Однако, вообще говоря, отмеченные обстоятельства отражают лишь частный и специфический аспект проблем распространения и выхода электромагнитных возмущений и не могут быть определяющими факторами на реальных трассах в геосреде.

С целью преодоления отмеченных трудностей предложено несколько подходов. Первый из них, основанный на классических представлениях электродинамической теории и строения геосреды, опирается на возможность формирования в ней ансамбля трещин, раскрывающихся когерентно в очаге разрушения [Сурков, 2007]. В этом случае важной особенностью геомагнитных возмущений, генерируемых этим ансамблем трещин, является то, что знак и поляризация поля во фронтальной зоне сигналов, которые опережают упругие волны, оказываются одинаковыми для всех трещин и при сложении одинаковых микрополей возникает эффект «когерентного» усиления суммарного сигнала. По оценкам, приведенным в работе [Сурков, 2007], этот эффект оказывается существенным на расстояниях, меньших или порядка размеров диффузионной зоны — десятки или сотни километров. Внутри и на границе этой зоны геомагнитные возмущения убывают с расстоянием как  $r^{-1}$ , а не как  $r^{-3}$ . Примечательно, что сейсмический сигнал, генерируемый этим ансамблем трещин, может оказаться очень слабым, поскольку акустическое излучение трещин некогерентно.

Другие неклассические механизмы генерации и распространения электромагнитных

возмущений рассмотрены в обзорной работе [Богданов и др., 2009в]. Они основаны на представлениях об активной роли геосреды. Здесь встречаемся с ситуацией, когда явления, по общепринятому мнению являющиеся невозможными, обнаруживаются в эксперименте [Богданов и др., 2009б, в].

Обратимся к некоторым особенностям генерации и распространения высокочастотного сейсмического шума (диапазон периодов  $10^{-1}$ — $10^{-3}$  с) [Гуфельд и др., 2008].

Наряду с классическими, с начала 1990-х годов получили распространение разные фрактальные подходы к его анализу [Мухамедов, 1992]. Фрактальная структура сигнала дает основание искать механизмы его генерации как некоторого критического неравновесного процесса. В частности, предложены модели механизма генерации высокочастотного сейсмического шума от фронтов самоорганизованного критического состояния, возникающих при деформировании дискретной геосреды. Существенно, что критическое состояние на фронте возникает самопроизвольно при внешних энергетических воздействиях на среду, обуславливающих возникновение фронта деформаций. Согласно [Мухамедов, 1992], модель фронта градиентной перколяции позволяет дать физическую интерпретацию наблюдаемых параметров высоко-частотного сейсмического шума как неравновесного самоорганизованного критического явления в геосреде.

Как уже отмечалось, успех в применении фрактальных моделей к геосреде обусловлен прежде всего тем, что фрактальные формы присущи большому числу процессов и структур. Без преувеличения можно сказать, что если вещество не находится в газообразном или кристаллическом состоянии, то оно, как правило, имеет в некотором диапазоне масштабов фрактальную структуру [Зосимов, Лямшев, 1995], например фронт, просачивающейся сквозь случайную пористую среду жидкости, области концентрации напряжений в геосреде. Фрактальным может быть множество точек пересечения некоторой величиной определенного уровня, плотность точек квадрата амплитуды процесса на временной оси и т.д. Важно, что сама фрактальная структура сигнала дает основание искать механизм его генерации как некоторого критического неравновесного процесса.

Согласно работе [Зосимов, Лямшев, 1995], волновые процессы во фрактальных структурах условно можно разделить на два типа:

– распространение волн во фрактальных структурах, когда фрактал является средой распространения;

– рассеяние и излучение волн самими фрактальными структурами, когда волны распространяются в среде с погруженными в нее фрактальными неоднородностями.

С этой точки зрения последовательное описание результатов, относящихся к изучению волновых процессов во фрактальных структурах, с одной стороны, и фрактальных структур, присущих волновым полям различной природы — с другой, является актуальной задачей современного этапа исследований. Действительно, при излучении волн фрактальными структурами особенности возникают уже в простейшем случае независимых (локальных) излучателей с фрактальным расположением в пространстве. Существо дела — в необычной зависимости интенсивности излучения фрактальной структурой от расстояния [Зосимов, Лямшев, 1995, с. 363].

Идеи об активной роли геосреды позволяют с иных, неклассических позиций подойти и к проблеме генерации электромагнитного шума. Согласно концепции динамически неустойчивой геосреды, предложенной И. Л. Гуфельдом [Гуфельд, 2007], динамические процессы, явления и вариации их параметров в принципе могут рассматриваться на основе представлений о реакции блочной среды на восходящие потоки легких газов — в основном, водорода и гелия. Как известно, эти газы могут аккумулировать энергию путем вхождения в жидкие и твердые растворы, кластерные структуры, химические соединения. Энергия дегазации, в отличие от других, обычно рассматриваемых источников энергии, может легко распространяться вдоль шовных зон и глубинных разломов, быстро концентрироваться и высвобождаться со скоростью взрывной или даже детонирующей волн [Вол, Гилат, 2006]. Распространение фронта концентрации флюида в геосреде по своей сути является автоволновым [Дмитриевский, 2008]. Этот процесс, очевидно, сопровождается потерей электронейтральности среды и быстрым изменением во времени ее физических (в том числе электромагнитных) свойств за счет образования, раскрытия и закрытия трещин, изменения структуры порового пространства, перераспределения флюида, изменения порового давления в порах и трещинах и, как следствие, изменение электропроводности и диэлектрической проницаемости среды. В итоге с распространяющимся фронтом

концентрации флюида может быть связано формирование и распространение фронта деформаций, фронта волны (автоволны) комплексной диэлектрической проницаемости. Эта «волна тензора комплексной диэлектрической проницаемости» (которая, в принципе, может быть как стоячей, так и бегущей, распространяющейся) как бы рассеивается на неподвижных или движущихся зарядах, сгустках зарядов или диполей, находящихся в геосреде, порождая электромагнитное (переходное) излучение. С этой точки зрения любое переходное излучение (рассеяние) можно рассматривать как процесс рассеивания (трансформации) возмущения или импульса волны комплексной проницаемости, связанной с распространяющимся фронтом концентрации флюида, образованием электромагнитных, а в принципе, и других волн [Гинзбург, Цытович, 1984].

При этом, если энергия физических полей не превышает некоторый критический уровень, возникает генерация связанных электромагнитно-акустических возбуждений (волн) в диапазоне кГц—Гц, наблюдаемых экспериментально [Дмитриевский, Володин, 2006]. Это излучение (рассеяние), очевидно, коренным образом отличается от обычного, связанного с колебаниями частицы в поле падающей электромагнитной волны. При этом процессы механоэлектромагнитных преобразований также реализуются преимущественно вдоль границ блоков и ослабленных зон, где происходит наиболее активная циркуляция флюидной фазы [Гуфельд, 2007; Богданов и др., 2009в, Шуман, 2010].

Сосредоточим внимание на ключевом и наиболее дискуссионном, по нашему мнению, аспекте проблемы, а именно на возможности выхода этого связанного акустоэлектромагнитного возмущения, формирующегося в литосфере под дном океана или моря, на поверхность водной среды и в атмосферу.

**Сейсмогидроэлектромагнитное взаимодействие и спонтанная электромагнитная эмиссия на акваториях.** Интерес к проблеме преобразования механических процессов ниже дна океана, покрывающего 75 % дневной поверхности, в электромагнитные сигналы выше его дна в морской среде, на ее поверхности и в атмосфере, значительно возрос в последние годы в связи с мониторингом цунами [Ершов и др., 2010а, б; Паламарчук, Кирейтов, 2010]. Кратко напомним существо дела.

В очаге землетрясения (размер которого определяет его энергию) генерируются сейс-

мические колебания. Последние представляют собой низкочастотные волны инфразвукового диапазона в твердой Земле. Эти волны подразделяются на поверхностные и объемные. Первые распространяются вдоль земной поверхности. Вторые, «просвечивающие», делятся на продольные (упругие волны сжатия) и поперечные (волны сдвига).

В фокусе современных исследований оказался следующий вопрос: можно ли получить информацию о строении и геодинамических процессах под дном океана или моря по регистрации электромагнитных сигналов на поверхности водной среды или в атмосфере над нею? Как свидетельствует эксперимент [Богданов и др., 2007; Ершов и др., 2010а, б; Паламарчук, Кирейтов, 2010], ответ должен быть положителен, хотя физика и математическая модель процесса все еще остаются крайне дискуссионными, противоречивыми, особенно в аспекте прохождения электромагнитным сигналом низкоомного участка трассы распространения из литосферы в атмосферу, относящегося к водной, хорошо проводящей среде. Так, в статье [Ершов и др., 2010а] используется математическая модель сейсмогидроэлектромагнитно-температурного взаимодействия геофизических полей, построенная на основе теории магнитотермоупругости и магнитной гидродинамики. Другая схема объяснения причины «... экспериментально подтвержденного прохождения электромагнитного излучения (ЭМИ) сквозь соленую воду следует искать в особых условиях и способах распространения ЭМИ в морской среде и волноводных эффектах распространения, свойственных некоторым из этих способов» [Паламарчук, Кирейтов, 2010]. При этом механизм реализации одного из них авторы представляют следующим образом. Образованные в зоне активного разлома под дном моря или океана электромагнитные и акустические возмущения (АВ-волны) распространяются вдоль разлома боковой волной вверх к его дну. Далее, распространяясь в морской среде «... акустические волны генерируют быстрые магнитоакустические волны (МАВ), которые со скоростями и частотами породивших их АВ ... осуществляют перенос электромагнитной энергии от источника АВ на достаточно большие расстояния. Выходя на поверхность морской среды, МАВ частично уходят в атмосферу в виде раздельно независимых ЭМИ И АВ» [Паламарчук, Кирейтов, 2010]. Спектр формирующихся таким образом электромаг-

нитных излучений, по оценкам этих авторов находится в пределах 70—100 Гц и выше.

Заметим, что ни о каком распространении электромагнитного излучения непосредственно через хорошо проводящую толщу морской воды (в виде электромагнитных волн по законам волнового уравнения) здесь речь не идет. Механизм его выноса всецело связывается с акустическими волнами (морские шумы, сейсмо- и акустические колебания), формирующимися в придонных участках земной коры и пронизывающими морскую толщу, находящуюся в постоянном магнитном поле Земли, которые возбуждают в ней магнитогиродинамические (МГД) волны. Часть из этих МГД-волн — магнитоакустические, «несомые» звуковыми волнами со скоростями и частотами того же (звукового) порядка, которые переносят электромагнитную энергию. Выходя на границу раздела «вода—атмосфера», магнитоакустические волны разделяются на акустическую и электромагнитную компоненты, частично уходящие в атмосферу, создавая, таким образом, фоновое СЭМИ, регистрируемое приборами, а частично возвращаясь обратно в водную среду в виде МАВ-волн.

Очевидно, для СЭМИ этого типа характерна весьма малая плотность излучаемой энергии. Только здесь важен не энергетический, а информационный аспект проблемы. Существенно то, что в соответствии с этой схемой над зоной разлома в земной коре под дном океана или моря в самой водной среде образуются аномальные области (неоднородности) клиновидной формы, которые способствуют и приводят к формированию локального аномального объекта с особыми условиями распространения акустических и магнитоакустических волн, что, в принципе, позволяет ставить задачу диагностики и картирования сейсмоактивных объектов в земной коре под океаном или морем на основе исследования СЭМИ, регистрируемого на поверхности морской среды или в атмосфере над ней.

Авторы упомянутых работ полагают и, очевидно, не без оснований, что предложенная ими математическая модель сейсмогидроэлектромагнитного взаимодействия может быть использована при разработке системы мониторинга моретрясений и цунами: теоретические характеристики сейсмогидроэлектромагнитных сигналов в общем соответствуют наблюдаемым [Ершов и др., 2010а].

**О взаимной трансформации электромагнитных и акустических волн на границе раз-**

**дела сред в магнитном поле.** Как известно, при падении электромагнитной волны на границу раздела проводящей и непроводящей сред, находящихся во внешнем магнитном поле, наряду с отраженной и преломленной электромагнитными волнами, образуются также расходящиеся от поверхности раздела звуковые волны. Соответственно при падении звуковой волны образуются расходящиеся от этой границы электромагнитные волны [Конторович, Глуцок, 1961; Кравченко, 1968; Васильев, Гайдуков, 1983; Каганов, Васильев, 1993]. Такая взаимная конверсия волн различных типов друг в друга может представлять интерес в связи с исследованиями магнитоакустических эффектов в металлах, морской среде, создания электромагнитных волн с большим замедлением (порядка отношения скорости света к скорости звука) и для генерации звука непосредственно в проводящей среде.

Суть электромагнитно-акустического преобразования (ЭМАП) состоит в том, что в среде, не обладающей ни пьезоэлектрическими, ни магнитострикционными свойствами, под действием электромагнитной волны возбуждаются ультразвуковые волны той же частоты (линейный отклик) и на кратных частотах (нелинейный отклик). При этом наличие границы раздела, как места сосредоточения возбуждающей силы, имеет принципиальное значение [Каганов, Васильев, 1993]. По мнению этих авторов, ЭМАП как физическое явление определяется рядом обстоятельств.

Во-первых, электромагнитная волна, падающая на границу раздела (поверхность металла) возбуждает акустические колебания электрически нейтрального тела. Во-вторых, мы сталкиваемся именно с кругом явлений, поскольку количество механизмов преобразования электромагнитных и акустических волн в металлах достаточно велико.

Ограничиваясь картиной ЭМАП в нормальном (несверхпроводящем и немагнитном) металле, в первом приближении можно выделить три механизма, обеспечивающих трансформацию энергии одного вида колебаний (электромагнитных) в энергию колебаний другого вида (упругих смещений) — инерционный, индукционный и деформационный. Они обусловлены действующей на кристаллическую решетку плотностью силы  $\mathbf{F}$ , которую можно представить в виде трех слагаемых:

$$\mathbf{F} = \mathbf{f}^s + \mathbf{f}^L + \mathbf{f}^{\text{Def}},$$

каждое из которых отражает специфическую

особенность динамики электронного газа [Каганов, Васильев, 1993].

Первое обусловлено неинерциальным движением кристаллической решетки. Это — сила Стюарта—Толмена:

$$\mathbf{f}^s = \frac{i\omega m}{e} \mathbf{j},$$

где  $m$  и  $e$  — масса и заряд электрона;  $\omega$  — частота;  $\mathbf{j}$  — плотность тока.

Второе проявляется лишь при наличии постоянного магнитного поля  $\mathbf{H}_0$ . Это — сила Лоренца:

$$\mathbf{f}^L = [\mathbf{j} \times \mathbf{H}_0] / c,$$

где  $c$  — скорость света.

Третье — плотность деформационной силы.

Общей чертой стюарт-толменовского и лоренцова взаимодействий является то, что они оба выражаются через плотность переменного тока, наводимого падающей электромагнитной волной в скин-слое. Своеобразные электромагнитно-акустические и акустоэлектромагнитные преобразования происходят в морской среде и на ее поверхности.

Как известно, в магнитогидродинамическом приближении в проводящей жидкости существует три типа волн (альфвеновские, быстрые и медленные магнитозвуковые), в которых колеблются как «акустические» (скорость  $v$ , давление  $p$ ), так и «электромагнитные» величины (ток  $\mathbf{j}$ , электрическое  $\mathbf{E}$  и магнитное  $\mathbf{H}$  поля). При выполнении условий

$$\omega_u / \omega_s = u^2 / s^2 \ll 1, \quad \sigma / \varepsilon \gg \omega_n,$$

где  $\omega_s = 4\pi\sigma s^2 / c^2$ ;  $\omega_u = 4\pi\sigma u^2 / c^2$ ,  $\sigma$  — проводимость,  $s$  — скорость звука,  $u = B / \sqrt{4\pi\rho_0}$  — скорость Альфвена, волна Альфвена и медленная магнитозвуковая волна представляют собой электромагнитные волны в среде, а быстрая магнитозвуковая — звук. При  $\omega = \omega_s$  ( $\omega = \omega_u$ ) сравнивается длина электромагнитной волны в среде  $\lambda_{\text{эм}} = c / \sqrt{4\pi\sigma\omega}$  с длиной звуковой  $\lambda_3 = s / \omega$  (альфвеновской  $\lambda_a = u / \omega$ ) волны.

При наличии магнитного поля в проводящей среде электромагнитные и акустические величины оказываются связанными между собой: при падении любой из трех волн (звуковой или одной из двух электромагнитных, различающихся поляризациями) возникает шесть расходящихся от границы раздела волн (четыре электромагнитные и две звуковые) [Конторович, Глуцок, 1961]. В частности, при падении инфразвуковой волны на рассматриваемую

границу (как со стороны атмосферы, так и со стороны водной среды) возникают не только отраженная и преломленная звуковые волны, но и затухающие электромагнитные волны в воде, а также электромагнитная волна в воздухе.

При углах падения звуковой волны со стороны морской среды

$$\varphi_n > \frac{s}{c} \sim 10^{-5}.$$

Электромагнитные волны, возникающие над морем в атмосфере, являются поверхностными со скин-глубиной в морской среде:

$$(J_m k_1)^{-1} = \lambda / 2\pi \sin \varphi_n,$$

где  $\lambda$  — длина звуковой волны в морской среде. Скорость их распространения вдоль границы раздела равна горизонтальной составляющей скорости звука, а соотношение амплитуд

$$H \sim 10^{-10} P_n,$$

где  $P_n$  — амплитуда давления в звуковой волне [Конторович, 1961].

Таким образом, если в среде создаются электромагнитные волны, то им передается, вообще говоря, малая доля энергии звука. Однако эта передача энергии может оказаться значительной при некоторых специфических условиях [Кравченко, 1968], например в случае пластины и резонансного возбуждения стоячих волн. При этом граница раздела как место сосредоточения возбуждающей силы имеет принципиальное значение [Каганов, Васильев, 1993].

**СЭМИ на акваториях — механизмы генерации, трансформации и распространения.** Очевидно, изучение электромагнитно-акустических и акусто-электромагнитных преобразований на границах раздела материальных сред — всего лишь первый шаг. Дальнейшие исследования связей и преобразований полей в системе литосфера—водная среда—атмосфера—ионосфера должны учитывать не только физическую сторону проблемы, но также цели и способы использования полученной информации. В рассматриваемом контексте остаются актуальными проблемы генерации, трансформации и распространения сейсмогидромагнитных возмущений.

Как уже отмечалось, идеи об активной роли геосреды позволяют более последовательно, по нашему мнению, подойти к их решению, принимая во внимание следующие характерные свойства геосистем:

- диссипативность динамики;
- компенсацию энергетических потерь за счет внешних источников;
- активность элементов — блоков, способных генерировать и излучать энергию в форме сейсмической, акустической, электромагнитной эмиссий и тепла — от простых одиночных импульсов до хаотических. Отличительные признаки таких нелинейных систем — необратимость изменения во времени, пространственная и временная иерархическая делимости (фрактальность), недетерминированность поведения после прохождения критической точки (бифуркация), волновая (автоволновая) и резонансная природа процессов, детерминированный хаос (самоорганизация), большая роль малых возмущений. На энергетических потоках в таких системах возможно формирование статических, пульсирующих или распространяющихся импульсных возмущений — автоволн.

Можно предположить, что в этом случае мы имеем дело с множеством механоэлектромагнитных преобразований, в том числе и переходное рассеяние (излучение) [Гинзбург, Цытович, 1984]. Переходное рассеивание — переходный процесс в нестационарной среде. И как уже отмечалось, любое переходное излучение можно рассматривать как процесс рассеяния (трансформации) возмущения или импульса волны комплексной проницаемости с образованием электромагнитных и других волн (возмущений).

Характерная особенность этого процесса в предельно энергонасыщенной среде — его неустойчивость:

- во-первых, постоянно меняются физико-химические свойства элементов и параметров контактного взаимодействия в пограничных структурах и внутри блоков земной коры за счет взаимодействия с восходящими потоками легких газов;

- во-вторых, на среду постоянно воздействуют флуктуационные и периодические возмущения, создающие в совокупности шумовое силовое поле [Гуфельд, 2007]. В итоге сейсмичность разного ранга оказывается связанной с разрушением связанных состояний.

Распространяющиеся импульсы (возмущения) — автоволны — взаимодействуют между собой и координируются: «выживает» наиболее устойчивая и геометрически простая конфигурация со стоячими волнами. Заметим в этой связи, что в неоднородной среде нет распространяющихся волн, волны являются стоячими [Раутиан, 2008].

Очевидно, такая геосистема способна формировать различные (в том числе и хаотические) пространственно-временные структуры с разной активностью связанного сейсмоэлектромагнитного излучения. Здесь следует предусмотреть также возможность различного физического содержания этих процессов на разных иерархических уровнях геометрически самоподобной блоковой системы (геосреды), в частности, генерации связанных сейсмоакустоэлектромагнитных возбуждений (импульсов) в диапазоне Гц—кГц, регистрируемых экспериментально [Дмитриевский, Володин, 2006].

Далее, учитывая отмеченные свойства геосреды и воспользовавшись некоторыми результатами, приведенными в работах [Ершов и др., 2010а, б; Паламарчук, Кирейтов, 2010], можно попытаться в общих чертах наметить следующую схему трансформации и выхода на дневную поверхность и в атмосферу сейсмоакустоэлектромагнитных возмущений, формирующихся в геосреде под морским дном.

Достигнув морского дна, связанное сейсмоакустоэлектромагнитное возмущение на этой границе претерпевает существенную трансформацию. В интересующем нас квазистационарном приближении его электрическая компонента в относительно тонком придонном слое будет практически полностью скомпенсирована за счет достаточно подвижных ионов морской среды. Что касается магнитной составляющей, то она распространяется в морской среде путем диффузионного просачивания в соответствии с уравнением диффузии со скоростью порядка сотен метров в секунду [Паламарчук, Кирейтов, 2010]. При этом наблюдается своеобразный эффект «замораживания» магнитного поля, вызванный тем, что электропроводность морской воды (порядка 4 См/м) примерно на два—три порядка превышает электропроводность пород подстилающей литосферы. Расчеты обнаруживают «наследование» диффузионным магнитным полем пространственной структуры сейсмоакустической составляющей возмущения (пространственной сейсмоакустомодуляции электромагнитной составляющей) [Ершов и др., 2010а, б].

Очевидно, эффект «замораживания» магнитной компоненты связанного сейсмоакустоэлектромагнитного возмущения мог бы существенно ослабить или полностью исключить появление значимого (экспериментально обнаруживаемого) электромагнитного сигнала на верхней границе «морская среда — атмосфера» в рассматриваемом здесь килогерцовом диапа-

зоне, если бы магнитное поле взаимодействовало с толщей морской воды самостоятельно, один на один. Но в связанном сейсмоакустоэлектромагнитном возмущении литосферного происхождения присутствует еще и его сейсмоакустическая компонента. Она без существенного затухания распространяется в морской среде. В итоге над зоной первоначального сейсмоакустогидродинамического контакта возникает область преимущественно вертикального движения морской воды и при наличии подмагничивающего магнитного поля  $H_0$  (магнитного поля земного ядра) возможно появление специфических магнитогидродинамических эффектов. В частности, при падении этого сейсмоакустического возмущения (волны) снизу на границу раздела «морская среда — атмосфера» возникают не только отраженная и преломленная сейсмоакустические волны, но и затухающие электромагнитные волны в морской среде и электромагнитная волна над ее поверхностью (в атмосфере) [Конторович, 1961]. При отсутствии нелинейных процессов в этой схеме трансформаций частоты уходящего в атмосферу электромагнитного поля имеют порядок частоты исходного сейсмоакустического сигнала. Далее, учитывая характер сейсмоакустических возмущений в морской среде, стохастический характер волнений и формы водной поверхности, можно предполагать, что электромагнитное излучение рассматриваемого частотного диапазона будет некогерентным [Кирейтов, 2010].

Согласно оценкам, выполненным в работе [Ершов и др., 2010а], уровень магнитного сигнала на поверхности моря и в атмосфере над ней будет составлять порядка сотни пикотесла. Это вполне измеримый сигнал, хотя его регистрация и должна выполняться на фоне интенсивных помех атмосферно-магнитосферного и промышленного происхождения.

Заметим, что «конус выноса» аномальной составляющей магнитного сигнала на водную поверхность претерпевает довольно умеренное уширение, о чем, собственно говоря, и свидетельствует выполненный авторами на акваториях Черного и Азовского морей эксперимент. Это позволяет сохранить в общих чертах основные принципы и приемы обработки и интерпретации результатов наблюдений, выработанные и опробованные при сухопутных исследованиях [Богданов и др., 2009; Старостенко и др., 2009].

**Закключение.** Оценивая тенденции развития исследований электромагнитных возмущений

в широком диапазоне частот на акваториях, можно отметить, что к настоящему времени достигнут заметный прогресс в понимании физики процессов, физической природы и предвестников цунами, закономерностей генерации и пространственной структуры акусто-сейсмоэлектромагнитного шума. Более очерченной выглядит и сложность задачи, определяемая необходимостью учета различного физического содержания процессов генерации этого шума на разных уровнях геометрически самоподобной блоковой системы (геосреды).

Дискуссионными остаются некоторые аспекты сейсмогидроэлектромагнитных взаимодействий и преобразований, инициированных сейсмическим возбуждением под океаническим или морским дном, включая и прохождение сигналом низкоомного участка трассы (слоя морской воды) из литосферы в атмосферу. Однако на поставленный ранее во-

прос: можно ли получить информацию о структуре геосреды и геодинамических процессах в ней под дном океана или моря, регистрируя естественное импульсное электромагнитное излучение на поверхности водной среды или в атмосфере, в принципиальном плане можно дать положительный ответ. Существенно, что этот вывод следует как из экспериментальных наблюдений, так и теоретических оценок. Авторы надеются, что этот, возможно, главный итог исследований последних лет, позволит ослабить известный скепсис в отношении и трактовке данной проблемы, все еще существующий среди профессионалов. Но следует идти дальше: приведенные в статье аргументы и механизмы сейсмоакустоэлектромагнитных преобразований, возможно, окажутся для этого весьма полезными, как и идеи о самоорганизации и образовании диссипативных структур в открытых активных геосистемах.

### Список литературы

- Богданов Ю. А. К проблематике распространения возмущений в геологических средах: краткий обзор актуальных источников и конструктивные соображения // Геофиз. журн. — 2008. — 30, № 1. — С. 96—110.
- 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., 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., Коболов В. П., Шуман В. Н. Вариации сейсмоэлектромагнитного фона Земли и сейсмическая активность // Геофиз. журн. — 2009б. — 31, № 3. — С. 95—106.
- Богданов Ю. А., Павлович В. Н. Неравновесное излучение земной коры — индикатор геодинамических процессов // Геофиз. журн. — 2008. — 30, № 4. — С. 12—24.
- Богданов Ю. А., Павлович В. Н., Шуман В. Н. Спонтанная электромагнитная эмиссия литосферы: состояние проблемы и математические модели // Геофиз. журн. — 2009в. — 31, № 4. — С. 20—33.
- Васильев А. Н., Гайдуков Ю. П. Электромагнитное возбуждение звука в металлах // Успехи физ. наук. — 1983. — 141, вып. 3. — С. 431—467.
- Вол А., Гилат А. 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.
- Гинзбург В. Л., Цытович В. Н. Переходное излучение и переходное рассеяние. — Москва: Наука, 1984. — 360 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.
- Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Похотелов О. А. Сейсмоэлектромагнитные явления. — Москва: Наука, 1988. — 174 с.
- 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. М. О.: ЦНИИ-Мам, 2007. — 160 с.
- Гуфельд И. Л., Корольков А. В., Новоселов О. Н., Собисевич А. Л. О природе высокочастотного сейсмического шума // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы. Матер. Всерос. конференции. (Москва, 22—25 апреля 2008 г.) — Москва: ГЕОС, 2008. — С. 146—148.

- Дещерский А. В., Лукк А. А, Сигорин А. Я. О новой парадигме прогноза землетрясений // Доклады РАН. — 2003. — **388**, № 2. — С. 233—236.
- Дмитриевский А. Н. Автоволновые процессы формирования флюидонасыщенных зон Земли // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы. Матер. Всерос. конференции. (Москва, 22—25 апреля 2008 г.) — Москва: ГЕОС, 2008. — С. 6—8.
- Дмитриевский А. Н., Вологин И. А. Формирование и динамика энергоактивных зон в геологической среде // Доклады РАН. — 2006. — **411**, № 3. — С. 395—399.
- Ершов С. В., Новик О. Б., Ружин Ю. Я. Электромагнитные сигналы деформационных процессов под дном океана. — 2010а. — <http://www.mivgu.ru/conf/murom2010/section4/23>.
- Ершов С., Михайловская И., Новик О. Сейсмоэлектромагнитные сигналы над океаном: от верхней мантии до ионосферы (физика, математическая модель, численное исследование). — 1010а. — <http://www.iki.ru/galeev/abs.-rus/a021003>.
- Зосимов В. В., Лямшев Л. М. Фракталы в волновых процессах // Успехи физ. наук. — 1995. — **165**, № 4. — С. 362—402.
- Каганов М. И., Васильев А. Н. Электромагнитно-акустическое преобразование — результат действия поверхностной силы // Успехи физ. наук. — 1993. — **163**, № 10. — С. 67—80.
- 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.
- Конторович В. М. О магнитогидродинамических эффектах в океане // Доклады АН СССР. — 1961. — **137**, № 3. — С. 576—579.
- Конторович В. М., Глуцюз А. М. Преобразование звуковых и электромагнитных волн на границе проводника в магнитном поле // Журнал эксперимент. и теоретич. физики. — 1961. — **41**, вып. 4(10). — С. 1195—1204.
- Кравченко В. Я. Электромагнитное возбуждение звука в металлической пластине // Журнал эксперимент. и теорет. физики. — 1968. — **54**, вып. 5. — С. 1494—1509.
- Ларина В. И., Мигулин В. В., Сергеева Н. Г., Сецин Б. В. Исследование динамики литосферы по спутниковым измерениям электромагнитного излучения // Вестник МГТУ. — **4**, вып. 1. — 2001. — <http://www.mstu.edu.ru/publish/vestnik/>.
- Левшенко В. Т. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы литосферного происхождения: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Москва: ОИФЗ РАН, 1995. — 36 с.
- Липеровский В. А. Физические модели связи в системе литосфера — атмосфера — ионосфера // Лекции БШФФ — 2006. — С. 58—65.
- Лукк А. А, Дещерский А. В., Сигорин А. Я., Сигорин И. А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. — Москва: ОИФЗ РАН, 1996 — 210 с.
- Мухамедов В. А. О фрактальных свойствах высокочастотного сейсмического шума и механизмах его генерации // Физика Земли. — 1992. — № 3. — С. 39—49.
- Николаев А. В. Развитие методов нелинейной геофизики // Вестник ОГГПГ РАН. — 2002. — № 1(20). — URL: [http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h\\_dgggms/1-2002/scpub.-3.htm#begin](http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2002/scpub.-3.htm#begin).
- Ночвай М. В., Маркова Г. Г., Гірняк Л. І. та ін. Звіт про пошукові і сейсмозвідувальні роботи МВХ СГТ на Керченському шельфі Чорного моря в 2001—2003 рр. — Київ: ДГП «Укргеофізика», 2003. — 96 с.
- Паламарчук В. К., Кирейтов В. Р. Проблемы информационного обеспечения и построения системы ближнего прогноза землетрясений // Междунар. ин-т нелинейных исследований. СО // WebGround01.06.2010 Наука: Физика (Ретроспекция). mhtml:file://E:\WebGround%2001\_06\_2010%20Наука%Физика%20(Ретроспекция... 01.11.2010).
- Раутиан С. Г. Об отражении и преломлении на границе среды с отрицательной групповой скоростью // Успехи физ. наук. — 2008. — **178**, № 10. — С. 1017—1024.
- Руденко О. В. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // Успехи физ. наук. — 2006. — **176**, № 1. — С. 77—95.
- Саговский М. А. Геофизика и физика взрыва. Избранные труды / Отв. редактор В. В. Адушкин. — Москва: Наука, 2004. — 440 с.
- Соболев Г. А., Пономарева А. В. Физика землетрясений и предвестники. — Москва: Наука, 2003. — 270 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., Лукин А. Е., Коболев В. П., Ру-  
саков 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.,  
Куприенко П. Я., Макаренко И. Б., Легостае-  
ва О. В., Лебедь Т. С. Модель глубинного строе-  
ния Донецкого складчатого сооружения и при-  
легающих структур по данным региональных  
геофизических наблюдений // Геофиз. журн.  
— 2009. — **31**, № 4. — С. 44—68.
- Стаховский И. Р. Самоподобная сейсмогенериру-  
ющая структура земной коры: обзор проблемы и  
математическая модель // Физика Земли. — 2007.  
— № 12. — С. 35—47.
- Сурков В. В. Электромагнитные эффекты при зем-  
летрясениях и взрывах. — Москва: Изд. Моск.  
инж.-физ. ин-та, 2000. — 235 с.
- Шуман В. Н. Концепция динамически неустойчи-  
вой геосреды и сейсмoeлектромагнитный шум  
литосферы // Геофиз. журн. — 2010. — **32**, № 6.  
— С. 101—118.
- Шуман В. Н., Богданов Ю. А. Электромагнитная  
эмиссия литосферы: пространственная структу-  
ра и возможные механизмы генерации // Геофиз.  
журн. — 2008. — **30**, № 6. — С. 39—50.
- Шуман В. Н., Причепий Т. И. Оптимальные режимы  
электромагнитных зондирующих систем с кон-  
тролируемым возбуждением поля в изотропных  
полях с дисперсией // Геофиз. журн. — 2004. —  
**26**, № 4. — С. 55—62.
- Bak P., Tang C. Earthquakes as self-organized criticality  
// J. Geophys. Res. — 1989. — **94**, № 15. — P. 635—  
637.
- Gershenson N., Vambakidis G. Modeling of seismo-  
electromagnetic phenomena // Russian Journal of  
Earth Science. — 2001. — **3**, № 4. — P. 247—275.