

УДК 550.384

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ В
АНТАРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ**

В.Н. Павлович^{1,4}, Ю.А. Богданов², В.Н. Шуман³, В.Н. Ващенко⁴

¹ *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина*

² *ООО «Юг-нефтегазгеология», Киев, Украина*

³ *Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина*

⁴ *Национальный антарктический научный центр МОН Украины, Киев, Украина*

Аннотация. В статье обсуждаются вопросы возникновения естественного импульсного электромагнитного излучения Земли и его использования для исследования земных недр. Основное внимание уделяется радиоизлучению в диапазоне 1кГц – 1 МГц, источники которого расположены в литосфере. Обсуждаются нелинейные аспекты механо-электромагнитных трансформаций и распространения электромагнитных волн. Рассмотрены различные модели генерации и распространения этих волн. Нами предложена модель генерации излучения, основанная на возбуждении оптических колебаний сложных кристаллических решеток, а значит и связанных с ними электромагнитных колебаний, при возникновении и движении точечных, линейных (дислокации) и объемных (микротрещины, поры) дефектов кристаллов. В физике твердого тела электромагнитное излучение, связанное с собственными (оптическими) колебаниями решетки, называют поляритонным излучением. Поскольку интенсивность рождения дефектов пропорциональна деформации кристалла, то интенсивность генерируемого сигнала будет максимальной в местах максимальной деформации коры. Этот факт позволяет применять спонтанное излучение для изучения структуры земной коры.

По отношению к испусканию поляритонов напряженные горные породы являются активной средой, т.е. существование излучения способствует рождению и уничтожению дефектов, что приводит к усилению излучения. Этот механизм нелинейного усиления электромагнитных волн совместно с существованием «окон прозрачности» может объяснить сверхслабое затухание электромагнитных волн в земной коре.

В работе приведены примеры использования геополаритонного излучения для исследования структуры ледников в Антарктике.

Ключевые слова: спонтанная электромагнитная эмиссия, литосфера, мантия, ледник, Антарктика

1. Введение

Как свидетельствует эксперимент, в земной коре, океане, атмосфере, ионосфере и магнитосфере Земли существуют электромагнитные возмущения естественного происхождения в весьма широком диапазоне частот [Сурков, 2000; Гульельми, 2007]. Наиболее известными и изученными из них являются электромагнитные возмущения (волны) в диапазоне периодов 0,2–600 с – ультранизкочастотные (УНЧ) электромагнитные волны различного генезиса. В то же время эксперимент показывает, что литосфера излучает достаточно высокочастотные электромагнитные волны с частотами вплоть до 1 МГц, интерес к которым в последние годы заметно возрос. Он обусловлен новыми возможностями, которые могут быть реализованы с их помощью, при решении разнообразных задач изучения строения литосферы, физико-химических процессов в ней, прогноза сейсмической активности и др. В целом изучение этого круга явлений имеет достаточно обширную экспериментальную и теоретическую основу, хотя все еще присутствует некоторая неопределенность существующих представлений о физических механизмах их генерации. В частности, к

настоящему времени список литературы по этим вопросам содержит сотни статей и десятки монографий, даже беглое обозрение которых представляет значительные трудности. По этой причине в дальнейшем в тексте цитируются в основном статьи и сборники обзорного характера. Очевидно, из них в первую очередь следует упомянуть обзорные работы [Сурков, 2000; Gershenson and Bambakidis, 2001; Гульельми, 2006; 2007; 2008; Богданов, 2007; Неновски, Бойчев, 2004 и др.]

Как известно, генерация электромагнитных сигналов литосферного происхождения может происходить как спонтанно, т.е. вне прямой зависимости с проявлением сейсмичности, так и вынужденно – вследствие движений горных пород при сейсмическом воздействии [Левшенко, 1995]. Такая терминология противоречит общепринятой физической терминологии: даже в отсутствие сейсмичности в земной коре присутствуют напряжения, обусловленные взаимным движением мантии, земной коры и различных блоков земной коры. Именно эти напряжения приводят к возникновению «спонтанной» эмиссии. При этом частотный диапазон возмущений, генерируемых геологической средой, достаточно широк – от 10^{-4} до 10^6 Гц [Гохберг и др., 1985; Левшенко, 1995; Сурков, 2000]. Однако традиционно при рассмотрении этого явления основное внимание уделялось УНЧ электромагнитным возмущениям литосферного происхождения в диапазоне периодов 0,2–600 с [Сурков, 2000; Гульельми, 2007; 2008] или даже еще более низкочастотным. В этом частотном диапазоне мощность скин-слоя электромагнитных возмущений в условиях реального геоэлектрического разреза может превышать десятки километров, поэтому возмущения данного типа выходят из мест генерации с достаточно малым поглощением. Что касается электромагнитных импульсов с частотами в десятки и сотни кГц или даже МГц, то мощность скин-слоя составит всего десятки – сотни метров. Казалось бы, радиоизлучение высокочастотного диапазона (3–300 кГц) не может выйти из области его генерации на глубине из-за сильного поглощения, чем и обусловлен скептицизм ряда авторов в отношении его использования при изучении глубоко залегающих объектов.

Широко распространены представления (и, по-видимому, достаточно обоснованные) о множественности механизмов генерации низкочастотных электромагнитных возмущений [Сурков, 2000; Гульельми, 2007]. Однако если вопросы генерации вынужденных (сейсмическими событиями) электромагнитных возмущений более проработаны, то теоретические подходы к анализу спонтанных возмущений отличаются схематичностью, неопределенностью и нечеткостью изложения [Шуман, 2007; 2008].

Отметим основные трудности, возникающие при их решении. Во-первых, это несовместимость масштаба проявления эффектов электромагнитного излучения с локальным характером их возбуждения, т.е. макроскопическим характером возмущений, распространяющихся в геологической среде, и локальной природой их генерации. Во-вторых, это объяснение физического механизма их «сверхдальнего» распространения от мест зарождения до пунктов регистрации на земной поверхности или над ней.

Первая трудность, вероятно, имеет чисто психологическую «геофизическую» основу. Почему-то ни у кого не возникают вопросы, когда атом с размерами ~ 1 А излучает свет с длиной волны $\sim 10^3$ А при электронных и $\sim 10^5$ А при колебательных переходах. Вторая трудность требует обоснованного физического объяснения.

Перед тем как перейти к дальнейшему анализу, следует определиться с понятиями. Под сейсмическими колебаниями будем понимать механические колебания среды с частотами менее 1 Гц. Механические колебания с частотами 1–20 Гц – инфразвуковые колебания, 20 Гц–20 кГц – звуковые колебания, более 20 кГц – ультразвук. Последние три типа объединяют под общим названием – акустические колебания. Часто в геофизической литературе понятие сейсмических колебаний распространяют на низкочастотные акустические, не определяя при этом частотных границ, а имея в виду лишь источник их возникновения. В длинноволновых

акустических и сейсмических колебаниях соседние атомы среды колеблются практически синфазно, причем сдвиг по фазе возрастает с ростом частоты колебаний.

Существует еще один тип механических колебаний кристаллических решеток – оптические (геологическая среда – это, как правило, поликристаллическая среда со сложными кристаллическими решетками). Они возникают в кристаллах, в элементарной ячейке которых содержится более одного атома. Наиболее ярко они проявляются в ионных кристаллах или в кристаллах с достаточно большой долей ионной связи. Большинство материалов геологической среды являются как раз такими кристаллами. В длинноволновых оптических колебаниях соседние атомы колеблются в противофазе, так что эти колебания приводят к изменению дипольного момента кристаллов, а значит к возбуждению электромагнитных волн. При механических воздействиях на кристаллы возбуждаются колебания обоих типов. В связи с этим становится очевидной целесообразность и необходимость совместного рассмотрения поля механических колебаний (сейсмических, акустических, оптических) и электромагнитного излучения, так как механические и электромагнитные колебания в рассматриваемой среде связаны между собой.

Совместные оптические и электромагнитные колебания в диэлектрической среде называются поляритонными колебаниями. Этот термин общепринят, вошел во все физические энциклопедии, и неприятие его многими геофизиками вызывает удивление. Любая электромагнитная волна в диэлектрике в области собственных частот колебаний кристалла (от нуля до частоты Дебая $\sim 10^{13}$ Гц) возбуждает оптические колебания (и наоборот), а значит в среде возникают поляритонные колебания. Термин «поляритон» компактный, и его применение для обозначения высокочастотных электромагнитных колебаний в геологической среде с нашей точки зрения оправдано.

2. Модели геосреды

Можно предположить, что в качестве фундаментальной основы анализа процесса генерации спонтанных литосферных возмущений выступают, по крайней мере, два основных фактора – это модель геологической среды и тип возможных механоэлектромагнитных преобразований. Ясно, что сейсмоэлектромагнитногенерирующая геосреда не может более рассматриваться в качестве континуума – ей оказалась присуща внутренняя самоподобная структура [Стаховский, 2007]. Она состоит из множества различных по размерам блоков, перемещающихся как единое целое и взаимодействующих в процессе перемещения. Это взаимодействие, сосредоточенное в основном вдоль границ блоков, включает процессы дробления, деформации и пластического течения отдельностей, зацепления механической и физико-химической природы, объемного деформирования и разрушения в пограничном слое блоков [Садовский, 1982; Даниленко, 1992; Дубровский, Сергеев, 2006; Старостенко и др., 2001].

Физическое самоподобие (фрактальность [Мандельброт, 2002]) всегда имеет пределы как в области больших, так и малых масштабов, в отличие от математических фракталов. Самоподобие геологической среды со стороны больших масштабов ограничено размерами плит земной коры. Со стороны малых масштабов это, вероятно, размеры кристаллических зерен, из которых слагаются поликристаллы земных пород. Сами кристаллические зерна – это не идеальные кристаллы, они содержат точечные, линейные (дислокации) и объемные (поры, микротрещины) дефекты. В работе [Стаховский, 2007, см. также ссылки в этой работе] предполагается, что именно микротрещины в горной породе создают фрактальное множество, по которому развивается магистральный разрыв (землетрясение). При динамическом взаимодействии блоков количество дефектов всех типов возрастает по сравнению с равновесными кристаллами.

Геологическая среда – термодинамически неравновесная система. Эта неравновесность обусловлена прежде всего взаимным движением мантии и земной коры, а также взаимным движением различных блоков, которые приводят к возникновению неоднородных механических напряжений, сосредоточенных в основном в пограничных слоях блоков. Очень часто эти напряжения превышают предел упругости, что приводит к рождению новых дефектов. Как правило, времена механической релаксации являются достаточно большими, так что на реальных промежутках времени напряжения не успевают релаксировать, что и обуславливает общую неравновесность системы. Кроме того, неравновесность обусловлена наличием градиентов других физических полей, в частности, температурного поля. Как известно (см., например, [Пригожин, Гленсдорф, 1980]), в сильно неравновесных системах могут возникать различные временные и пространственные структуры (диссипативные структуры), которые могут влиять на (и определять) процессы генерации и распространения волн. Именно образование диссипативных структур и называется самоорганизацией, и вполне возможно, что образование фрактальной структуры земной коры и является проявлением такой самоорганизации. Последнее предположение требует доказательства, хотя бы на уровне моделей.

В литературе часто предполагается (см., например, [Дмитриевский, Володин, 2006; 2008]) наличие в земной коре энергоактивных зон, существование которых может привести к нелинейным эффектам при распространении волн различной природы. Предложенные механизмы накопления энергии в этих зонах, вообще говоря, недостаточно проработаны, а иногда и нефизичны. Однако на современном этапе, наверное, ни у кого не вызывает сомнения, что геологическая среда является нелинейной и в ней могут распространяться нелинейные волны. Физическая природа нелинейности может быть разной в каждом конкретном случае в зависимости от типа волн и частотного диапазона.

Существенным признаком геологической среды является присутствие флюидов. Сам термин «флюид» предполагает наличие текущей жидкости. Во многих случаях флюид – это просто минерализованная вода, часто в смеси с углеводородами, насыщенная газами и солями, конкретный состав которой определяется составом окружающей породы, температурой и давлением. Во всяком случае флюид – это проводящая жидкость (или газ), которая может двигаться по границам между блоками (разломам, трещинам, границам зерен и пр., в общем случае, топологически связным областям). Именно с наличием движущихся флюидов связывают существование так называемых электрокинетических эффектов, т. е. возбуждение электромагнитных колебаний при движении заряженной жидкости. При отсутствии катастрофических изменений (без землетрясений) такое движение является медленным, обусловлено градиентами различных полей и может привести к возбуждению только низкочастотных электромагнитных колебаний в области УНЧ.

Таким образом, геологическая среда является неравновесной нелинейной неоднородной фрактальной средой, сложная геометрия которой сказывается на всех процессах, протекающих в такой среде. Известно, например [Фракталы..., 1988], что в таких средах процессы диффузии, электропроводности, распространение и рассеяние волн происходят иначе, чем в традиционных сплошных средах. Геофизические приложения этих вопросов находятся в настоящее время в зачаточном состоянии.

3. Механизмы генерации и распространения волн

В нелинейных системах, какой, вероятно, является геологическая среда, процессы генерации и распространения волн тесно связаны. Многие конкретные вопросы, относящиеся к механизмам механоэлектромагнитных преобразований (преобразований энергии движения пород геосреды в энергию электромагнитного излучения) в широком диапазоне частот,

структуре и особенностям пространственного распределения интенсивности излучения, всё еще остаются открытыми и требуют дальнейшего изучения. Очевидно, именно неустойчивые системы и возбудимые среды здесь выступают на первый план. Уточнению деталей этого процесса и посвятим дальнейшее изложение, концентрируя внимание на физической стороне проблемы генерации и возможностях использования полученных закономерностей для геолого-геофизических приложений, в частности в Антарктическом регионе.

Рассмотрим вначале линейные модели генерации. Принимая земную кору как пористую влагонасыщенную среду, обладающую магнитной структурой и находящуюся в постоянном магнитном поле земного ядра, А.В. Гульельми и В.Т. Левшенко предложили следующее достаточно общее линейное уравнение генерации сейсмомагнитных сигналов, которое единообразно описывает возбуждение низкочастотного магнитного поля $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$ в результате действия известных четырех механизмов генерации – пьезомагнитного, индукционного, деформационного и инерционного, учитывая основные элементы механики горных пород – ускорение, скорость, деформацию и напряжение [Гульельми, 1995; 2007; 2008; Левшенко, 1995]:

$$\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)}{\partial t} - \frac{c^2}{4\pi\sigma} \nabla^2 \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \nabla \times \mathbf{C}(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

где σ – проводимость горных пород, c – скорость света в вакууме, $\mathbf{C} = \sigma \mathbf{A} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}_0 + \beta \theta \mathbf{E}_0 + \nabla \times \mathbf{M}$, $\mathbf{A} = \partial \mathbf{v} / \partial t$ – ускорение горных пород, \mathbf{v} – скорость, α – коэффициент механомагнитной трансформации, \mathbf{B}_0 – главное геомагнитное поле, $\beta = \partial \ln \sigma / \partial \theta$, $\theta = \nabla \cdot \mathbf{U}$, \mathbf{U} – поле смещений, \mathbf{M} – магнитный момент единицы объема среды, $M_i = (\gamma_1 P_{ij} \delta_{ij} + \gamma_2 P_{ij}) B_{0j}$, P_{ij} – давление в направлении, параллельном осевой нагрузке.

Предполагается, что проводимость горных пород σ , параметры механомагнитной трансформации α , β , γ_1 , γ_2 , а также стороннее электрическое \mathbf{E}_0 и магнитное \mathbf{B}_0 поля однородно распределены в пространстве и не зависят от времени. Однако эти параметры изменяются в широком диапазоне значений, с трудом поддаются измерению и при количественных оценках, вообще говоря, необходимо задание всего их набора применительно к конкретному региону исследований.

Очевидно, что уравнение генерации (1) следует решать при заданном движении среды и заданных граничных условиях. Однако ценность такого решения для интерпретации конкретных событий будет невелика до тех пор, пока не определены значения феноменологических параметров среды распространения. Существенно, что в силу линейности уравнения (1) можно изучать различные механизмы генерации независимо друг от друга, складывая затем полученные результаты [Гульельми, 2007; 2008].

Используя уравнение (1), можно выполнить сравнительный анализ относительной эффективности механизмов генерации [Гульельми, 2007; 2008], в частности индукционного, связанного с движением проводящих образований земной коры, и инерционного, при котором генерация магнитного поля обусловлена сдвиговым течением флюида в порах и трещинах относительно скелета горной породы. Установлено, что существует критическая частота, на которой оба механизма одинаково эффективны, однако на меньших частотах доминирует индукционный механизм, а на больших – инерционный.

Необходимо отметить, что уравнение (1) получено в квазистационарном приближении, когда изменения состояния системы пренебрежимо малы за времена, за которые сигнал проходит расстояние R от источника до точки наблюдения. Условие применимости этого приближения при распространении сигнала в вакууме

$\frac{R}{c} \ll T$, где T – характерный период изменений.

Например, для частот 100 Гц условие квазистационарности выполняется на расстояниях не более 100 км, а для частот 100 кГц – на расстояниях не более 1 км от источника.

Если сигнал распространяется в геологической среде, то эти результаты действительны для диапазона частот, в котором скин-глубина достаточно велика и, соответственно, этот тип возмущений может выходить из зоны генерации. Что касается радиоизлучения на частотах в десятки и сотни кГц или даже МГц, то казалось бы, что оно не может выходить из очага на глубине. В поверхностном же слое мощностью 10–150 м весьма проблематично найти достаточное число источников радиоизлучения и еще труднее связать его с сейсмическим очагом или динамическими процессами, приводящими к его излучению [Сурков, 2000]. Следовательно, объяснение механизма дальнего распространения электромагнитного излучения и его выхода на дневную поверхность в рамках классической линейной электродинамической теории встречается с серьезными затруднениями.

Напомним, что с точки зрения классической электродинамики возможность «сверхдальнего» распространения на удалении, значительно превышающие мощность скин-слоя, может быть обусловлена двумя причинами [Шуман, Богданов, 2008]: во-первых, это наличие в соответствующей среде распространения немонотонной зависимости фазовой скорости волны от поперечных к направлению распространения координат (например, от глубины). Имеются в виду либо волноводы, либо поверхностные волны. Во-вторых, это возможность появления (раскрытия) промежуточного «дисперсионного» окна, в частотном диапазоне которого электромагнитные импульсы могут распространяться на большие расстояния практически без существенных искажений. При этом амплитуда импульса относительно слабо зависит от проводимости среды, если ширина спектра излучаемого импульса не превышает ширины «промежуточного окна», появление которого в диспергирующей среде связано с аномальным ростом значений относительной диэлектрической проницаемости, установленным экспериментально на некоторых образцах пород на частотах ниже 25 МГц [Шуман, Причепий, 2007]. Этот рост изменяет соотношение между токами проводимости и поляризационными, выполняющими роль токов смещения в среде с дисперсией на этих частотах. Однако отмеченные обстоятельства отражают специфический аспект рассматриваемой проблемы распространения и, в общем, не могут быть определяющими факторами на реальных трассах в геологической среде. Стоит отметить, что появление «дисперсионного окна» – это экспериментальный результат, и его физическая причина не обязательно лежит в рамках классической (линейной) электродинамики.

С целью преодоления отмеченных затруднений предложено несколько моделей генерации и распространения. В частности, в рамках классического подхода высказана гипотеза, в соответствии с которой УНЧ-шум может быть связан как с появлением в очаге генерации трещин отрыва, так и с эффектом дилатансии [Сурков, 2000]. Важно, что эффективные магнитные моменты всех раскрывающихся трещин отрыва параллельны и направлены противоположно B_0 (вектору индукции геомагнитного поля), что ведет к когерентному усилению УНЧ электромагнитного поля ансамбля трещин, раскрывающихся в окрестности очага. Из полученных оценок следует, что временные и спектральные характеристики геомагнитного излучения определяются динамикой роста трещин и процессом их концентрации в зоне разрушения среды. Существенно, что сейсмический сигнал, генерируемый всеми трещинами, может быть очень слабым, в то время как оценки амплитуд УНЧ электромагнитного шума в рамках этой модели согласуются с экспериментальными данными, полученными перед некоторыми землетрясениями [Сурков, 2000]. Отметим, что при раскрытии трещин генерируются также высокочастотные электромагнитные сигналы, вплоть до рентгеновских частот. Генерируются и высокочастотные акустические колебания.

В рассматриваемом контексте, очевидно, решение задачи о генерации радиоизлучения и его «сверхдальнем» распространении более естественно искать, опираясь на нелинейную теорию преобразования энергии движения горных пород в энергию геомагнитного поля с

учетом многообразия эмпирических закономерностей, свидетельствующих о связи его свойств со структурой и динамикой геофизических систем. В ее рамках предложено несколько моделей генерации.

Одна из них основана на возникновении при энергетической накачке оптических колебаний сложных кристаллических решеток и связанных с ними электромагнитных возмущений, при рождении и движении точечных, линейных (дислокаций) и объемных (микротрещины) дефектов кристаллов [Богданов, Павлович, 2008]. Но поскольку интенсивность рождения дефектов прямо пропорциональна деформации кристаллов, то и интенсивность генерируемых волн оказывается максимальной в областях наибольшей деформации земной коры. При этом главный вопрос, связанный со сверхдальним распространением электромагнитных возмущений, по мнению авторов [Богданов, Павлович, 2008], может быть решен на основе нелинейного механизма усиления электромагнитных волн при их взаимодействии с дефектами кристаллической решетки вещества земной коры, находящейся в термодинамически неравновесном состоянии. По сути, этот механизм очень близок к механизму сверхизлучения Дикке (см., например, [Меньшиков, 1999]). Более того, при микроскопическом рассмотрении этого механизма можно получить гамильтониан, очень близкий к гамильтониану Дикке.

Явление сверхизлучения – коллективное излучение возбужденной среды – впервые было экспериментально обнаружено в астрофизике как излучение Крабовидной туманности – остатка сверхновой. В 1954 г. Дикке впервые предложил теорию сверхизлучения, после чего это явление было обнаружено в плазме, лазерах, мазерах, инвертированном твердом теле, парах цезия и иных возбужденных объектах [Меньшиков, 1999]. В связи с тем, что недра Земли из-за тектонических движений постоянно находятся в энергетически возбужденном состоянии, особенно в зоне разломов, возникают условия для генерации сверхизлучения как источника естественного поля Земли.

Сущность механизма сверхизлучения сводится к коррелированному взаимодействию осцилляторов с полем, приводящим к возникновению синфазного колебания излучателей и резонансного взаимодействия с горной средой и, как следствие, приводящего к появлению излучения в направлении простираения среды.

Для спонтанного излучения инвертированной среды, известной как люминесценция, характерно линейное соотношение между размерами активной среды и интенсивностью излучения:

$$I \approx I_0 n L, I_0 = \frac{\hbar \omega}{\tau_0};$$

где I_0 – интенсивность излучения изолированного осциллятора, n – плотность осцилляторов на единицу длины, L – наибольшая протяженность возбужденной среды, $\omega = (E_2 - E_1) / \hbar$ – частота излучения, τ_0 – характерное время спонтанного перехода $E_2 \rightarrow E_1$.

Характерной особенностью сверхизлучения является наличие импульсного анизотропного излучения с длительностью τ_s и интенсивностью I , пропорциональной квадрату размера тела и количества излучателей:

$$\tau_s = \frac{\tau_0 k^2}{3 \pi n L}, I \approx I_0 L^2 n^2;$$

Главной отличительной особенностью сверхизлучения от обычной люминесценции является сильная зависимость от размеров и формы активного тела. Для этого излучения необходим некоторый критический размер тела, вытекающий из основного условия осуществления СИ в протяженных телах:

$$3 \pi n L / k^2 \gg 1,$$

где a – характерное расстояние между излучателями, L – длина тела, $k = \omega / c$, $\lambda = 2 / k$, $\omega = (E_2 - E_1) / \hbar$. Для сверхизлучения также характерна независимость спектрального состава излучаемого импульса от энергии излучения. Увеличение энергии излучения выражается в увеличении интенсивности излучения.

В последнее время в литературе широко обсуждаются вопросы, связанные с распространением нелинейных волн в геологической среде – солитонов, автосолитонов, автоволн (см., например, Дмитриевский, Володин, 2006; 2008). Для применения этих понятий в геофизике важно четко понимать область их определения. Солитон (solitary wave) – это уединенная волна, сохраняющая свою форму и скорость после столкновения с другой такой уединенной волной [Солитоны, 1983]. Солитоны являются решениями нелинейных уравнений, описывающих поведение гамильтоновых консервативных систем. Форма солитонов сохраняется благодаря конкуренции между нелинейностью и дисперсией: нелинейность приводит к увеличению крутизны фронта волны, а дисперсия – к ее расплыванию. Понятно, что в консервативных гамильтоновых системах диссипация не учитывается, поэтому понятие солитона можно использовать в системах, где процессы рассеяния энергии волны в среде пренебрежимо малы, например, распространение света в диэлектриках, в которых и наблюдалось явление самоиндуцированной прозрачности, связываемое с солитонами. С этой точки зрения геологическая среда вряд ли является «претендентом» на распространение в ней солитонов.

Другой тип нелинейных волн, автосолитоны [Кернер, Осипов, 1991], распространяются и формируются в диссипативных неравновесных средах, каковой и является геологическая среда, и они представляют собой один из видов самоорганизации системы. Автосолитон – это уединенное собственное состояние системы, и его параметры полностью определяются параметрами среды и не зависят от начального возмущения – с одной оговоркой. Для возбуждения в среде автосолитона в большинстве случаев начальное возмущение должно быть достаточно мощным (с большой амплитудой) и длительным, т. е. малые возмущения в среде затухают, а большие преобразуются в автосолитоны. Поэтому естественное электромагнитное излучение Земли с достаточно малыми амплитудами вероятнее всего не состоит из автосолитонов. Однако сейсмические, акустические и электромагнитные волны, возбуждаемые при землетрясениях, скорее всего представляют собой автосолитоны. Эти волны не являются предметом рассмотрения данной статьи.

Движущийся автосолитон – это один из видов более широкого понятия автоволны, обусловленной именно ее формой в виде уединенной волны. Автоволны могут иметь различную форму, в частности в виде фронта, когда система переходит из некоторого начального состояния в конечное. Типичный пример автоволны в виде фронта – горение бикфордова шнура. Примеров возникновения автоволн множество, и они реализуются в различных системах – физических, технических, химических, биологических (см., например, [Васильев и др., 1987]). Теория автоволн и автосолитонов в настоящее время разработана достаточно подробно, поэтому на ее основе существует возможность анализа возникновения таких структур в геологической среде.

4. Автоволновые механизмы дегазации Земли, флюидодинамика и генерация радиоволнового шума

Как уже отмечалось, состояние геосистемы саморегулируется и саморазвивается под действием постоянно меняющегося во времени глубинного энергетического потока, формируя пространственно-временные диссипативные структуры при достаточной степени неравновесности. Понятие энергетического потока стоит детализировать. Основная часть потока энергии, идущей от глубин Земли к поверхности, – это тепловой поток, обусловленный градиентом температур. Взаимное движение мантии и земной коры создает градиенты

напряжений, деформаций и давления в земной коре. При пластической и хрупкой деформации рождаются акустические и электромагнитные волны, также переносящие энергию из глубин к поверхности. Наличие градиентов различных полей создает условия для переноса вещества. В нормальных, некатастрофических условиях – это перенос жидкостей и газов. Таким образом, энергия из глубин к поверхности передается в виде тепловой, электромагнитной, акустической энергии и энергии движущегося вещества газов и жидкостей (флюидов).

Основной причиной движения флюидов является наличие градиентов физических полей. Однако в неравновесных нелинейных средах возможны другие механизмы переноса, например эффект Степанова – ускоренное движение жидкости через капилляры при наличии ультразвука.

В общем случае энергетическая накачка геологической среды способствует формированию активных систем, характеризующихся нелинейной динамикой совокупности физических полей. В стандартной постановке задачи система уравнений макроскопической кинетики, описывающая движение флюида через геосреду в некотором поле (температурном, электромагнитном, акустическом), допускает автоволновое решение в виде распространяющегося фронта концентрации флюида, что, как следует из типа уравнения, по существу является автоволновым процессом. При дополнительной подкачке энергии в геосреду в таких системах могут возникать статические, пульсирующие и бегущие области концентрации флюида, вне которых локальная энергия и концентрация флюида остаются практически постоянными. Генерируемые и излучаемые из этих локализованных областей – уединенных состояний или автосолитонов – электромагнитные и сейсмоакустические поля (импульсы) выходят на дневную поверхность и могут быть зарегистрированы геофизическими методами. Вообще говоря, эти общие рассуждения должны быть проиллюстрированы на конкретных математических моделях, учитывающих геофизические особенности.

С учетом сказанного становится понятным смысл предложенного ранее нелинейного уравнения генерации электромагнитного шума типа «реакция – диффузия» в возбудимой геосреде (системе литосферных блоков, разделенных ослабленными переходными зонами, имеющего пространственно локализованные, неподвижные или подвижные решения [Шуман, 2007; Шуман, Богданов, 2008а; Шуман, Богданов, 2008б]). Это уравнение обобщает известное квази-стационарное уравнение Максвелла. В качестве исходной «механической компоненты» модели генерации принята теория «захваченных» волн (обобщенных волн Рэлея), распространяющихся вдоль зон контакта литосферных блоков (локализованных неравновесных областей или возмущений объемной деформации), имеющая и экспериментальное обоснование [Дубровский, Сергеев, 2006; Li et al., 1990].

Обобщенные волны Рэлея экспоненциально затухают по обе стороны от плоскости разлома и канализуются этой плоскостью. По этой причине они получили название «захваченных». Эти волны могут принимать энергию сейсмических объемных волн. Согласно [Дубровский, Сергеев, 2006], это означает рост захваченных волн по амплитуде и тем самым неустойчивость основного состояния взаимного скольжения блоков. Неустойчивость скольжения вдоль разломов в свою очередь диктует неустойчивость деформации твердого тела с существенным уменьшением сдвиговых характеристик [Дубровский, Сергеев, 2006]. При этом в качестве базового процесса механоэлектромагнитных трансформаций в работе [Шуман, Богданов, 2008 б] рассматривается переходное излучение (рассеяние) в нестационарной геосреде [Гинзбург, Цытович, 1984], генерируемое полем зарядов в волне комплексной диэлектрической проницаемости, которая формируется в окрестности фронта распространяющейся вдоль разлома и канализуемой им «захваченной» волны.

Вообще говоря, решение поставленной общей задачи является достаточно непростым. Нужно решить систему уравнений Максвелла и уравнение для распространения «захваченной» волны вдоль границы раздела двух сред, причем в уравнениях Максвелла

необходимо ввести в явном виде зависимость диэлектрической проницаемости от параметров волны. Если учесть, что решение, соответствующее наблюдаемому в эксперименте [Li et al., 1990] случайному скачкообразному проскальзыванию границы раздела, не получено в явном виде, а непрерывное плавное скольжение является неустойчивым [Дубровский, Сергеев, 2006], то задача становится неразрешимой. Однако можно попытаться решить задачу с модельной зависимостью диэлектрической проницаемости в виде некоторой зависящей от времени случайной функции, т. е. задачу о параметрическом возбуждении колебаний случайной силой.

Теперь попытаемся усилить и конкретизировать эти результаты, принимая во внимание автоволновые решения в виде распространяющегося фронта концентрации флюида, в окрестности которого также возможны формирование «волны» комплексной диэлектрической проницаемости и, соответственно, генерация переходного рассеяния (излучения) при ее падении на отдельные заряды, сгустки зарядов, электрических диполей и других рассеивателей, содержащихся и появляющихся в геосреде в процессе ее деформирования. Вынос этого излучения на дневную поверхность в этом случае также оказывается возможным благодаря своеобразному эффекту самоиндуцированной прозрачности, формирующемуся при распространении фронта концентрации флюида в геологической среде на энергетических потоках, что, как следует из типа уравнения, является автоволновым процессом.

Как уже отмечалось, в сложноструктурированной геологической среде – активной системе – существуют комплексы нелинейных взаимодействий между физическими полями и ее подсистемами. В таких системах могут возникать статические, пульсирующие или бегущие области концентрации, вне которых локальная энергия и концентрация относительно постоянны. Организованные и излучаемые из этих областей электромагнитные и акустические поля могут быть зарегистрированы на дневной поверхности, что, в принципе, позволяет исследовать процессы нелинейной флюидодинамики Земли [Дмитриевский, Володин, 2008].

Следовательно, процессы флюидопереноса в значительной степени могут определяться нелинейной динамикой автосолитонов, что позволяет с новой точки зрения рассматривать механизмы пространственно-временной импульсной дегазации Земли и, соответственно, сейсмоэлектромагнитной эмиссии. Это открывает новые возможности для совместной интерпретации различных геофизических и геодинамических данных.

После сделанных замечаний и принимая во внимание то обстоятельство, что общепринятым описанием возбудимых (активных) сред являются параболические уравнения (или их системы) типа «реакция – диффузия» [Давыдов и др., 1991], становится более понятным смысл и значение предложенного ранее нелинейного обобщенного уравнения генерации геомагнитного шума [Шуман, 2007; 2008; Шуман, Богданов, 2008 а]:

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

где α_{ij} – матрица (коэффициент) диффузии; B_i – индукция; $F_i(\mathbf{B})$ – нелинейная функция, задающая интенсивность механоэлектромагнитных преобразований и определяемая динамичностью процессов деформирования возбуждаемой геосреды.

Как известно, система нелинейных уравнений типа (2) в общем случае имеет пространственно локализованные неподвижные (типа стоячих волн) и сложно движущиеся решения. При этом основные закономерности образования автоволновых структур, в принципе, можно воспроизвести уже в рамках двухкомпонентной системы:

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

где функция G определяет интенсивность и масштаб динамических источников генерации геомагнитных возмущений. В частности, G может быть концентрацией флюида или одной из компонент флюида. При этом характерные «возбудимые» свойства таких систем обычно определяются выбором своеобразной N -подобной формы нелинейной функции $F_i(V, G)$ [Давыдов и др., 1991]. Случай $\varepsilon = 0$ соответствует однокомпонентной системе, имеющей два устойчивых состояния [Давыдов и др., 1991].

Заметим, что весьма полную информацию о процессе эволюции автоволновой структуры можно получить, описывая только изменение во времени фронта волны. Эта идея, существенно упрощающая рассмотрение автоволновых процессов, положена в основу кинематического подхода к описанию автоволновых структур [Давыдов и др., 1991]. Она может казаться востребованной с той точки зрения, что генерация сейсмoeлектромагнитного излучения наиболее активно проявляется на распространяющихся фронтах концентрации флюида, в окрестности которых оказывается возможным формирование «волны» комплексной диэлектрической проницаемости, при падении которой на отдельные заряды или сгустки зарядов и возникает переходное рассеяние.

В целом же решение задачи генерации сейсмoeлектромагнитного шума, возможно, следует искать в тесной связи с автосолитонными механизмами дегазации Земли с учетом многообразия механоэлектромагнитных преобразований и эмпирических закономерностей связи характеристик этого излучения со структурой и динамикой геосистем.

5. Экспериментальные данные

Примечателен тот экспериментально установленный факт, что пространственные параметры аномалий интенсивности излучения на дневной поверхности и их соотношения практически не зависят от распределения электрических характеристик разреза, а определяются глубиной погружения «излучающего» элемента. В то же время амплитудные характеристики сигнала несут информацию о физических свойствах пород вдоль трассы его распространения [Богданов и др., 2003; 2007].

Экспериментально показано, что интенсивность электромагнитного излучения в радиоволновом диапазоне (число импульсов в единицу времени, амплитуда которых превышает заданный порог) характеризуется значительной пространственной неоднородностью. Пространственные размеры и форма этих аномалий могут служить основой для восстановления геометрии геологического разреза. При этом характеристики излучения от схожих структур имеют близкие параметры независимо от их местонахождения. Для восстановления структуры можно использовать как изменения интенсивности вдоль профиля наблюдения, так и спектральные компоненты вейвлет-преобразования сигнала. Как известно, вейвлет-преобразование позволяет выделить границы аномальных зон, определить их пространственные размеры и получить информацию о глубине залегания излучающего объекта.

Проиллюстрируем сказанное на частных примерах изучения структуры ледников в Антарктиде. Исследование было проведено с помощью прибора «Тезей» в 2005, 2006 гг. на леднике острова Галиндез во время сезонных работ украинских антарктических экспедиций. Прибор представляет собой анализатор активности (число импульсов в единицу времени с амплитудой, превышающей 5 мкВ/м) геополяритонного поля с широкополосной рамочной антенной (магнитная компонента электромагнитного поля регистрируется перпендикулярно плоскости рамки).

Координаты и высота точки регистрации определялись при помощи GPS технологии. Данные непрерывно записывались в DGPS контроллер в процессе измерений. Расположение профиля показано на рис. 1.

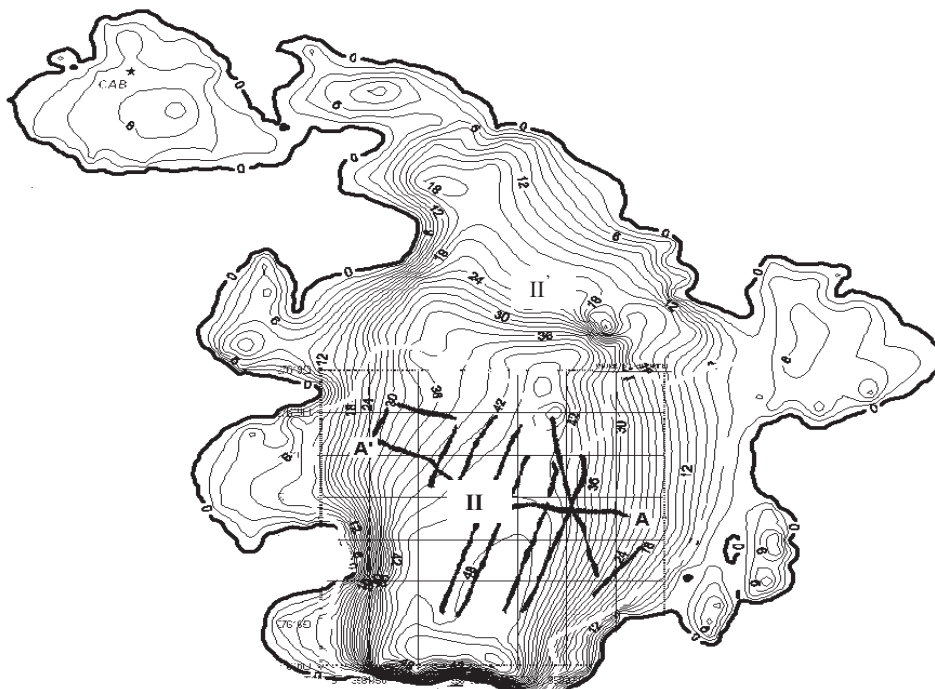


Рис. 1. Профиль геополяритонного зондирования.

Результаты представлены в виде карты интенсивности геополяритонного излучения (рис. 2) и в виде геологических разрезов (рис. 3, 4) по линиям А-А и II-II. Карта (рис. 2) показывает нарушения структуры в субмеридиональном направлении и субширотные нарушения в виде арок, которые могут быть обусловлены движением ледника.

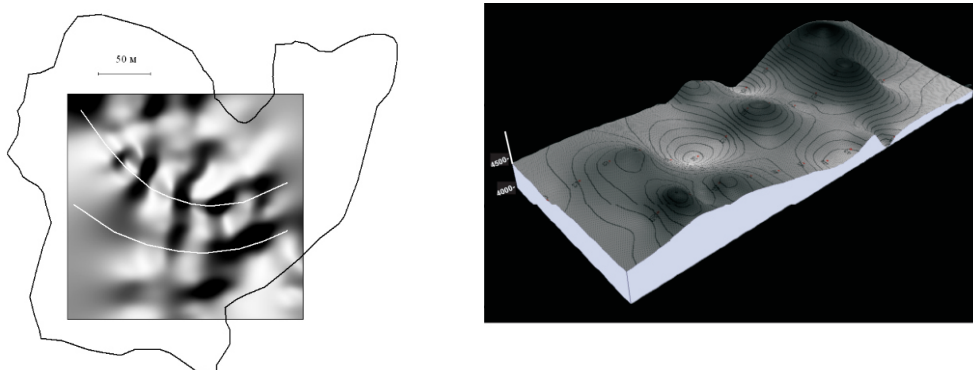


Рис. 2. Карта интенсивности излучения на леднике острова Галиндез. Контур указывает на границы ледника. Белые линии на левом рисунке – аркообразные нарушения. Слева также виден фрагмент обводненной части подстилающей скальной поверхности (выделен белым цветом).

Как известно, линии максимальных скоростей движения ледника локализованы вблизи его середины. При удалении от оси ледника скорости падают вследствие трения о дно и берега долины ледника. В нашем случае аркообразные нарушения могут быть вызваны именно такими изменениями скоростей. Зоны максимальной выпуклости обнаруженных структур (перпендикулярно к линии арки) указывают на движение ледника в юго-юго-западном направлении.

Геологический разрез построен вдоль линии А–А (рис.3) с северо-запада через центральную часть ледника к востоку.

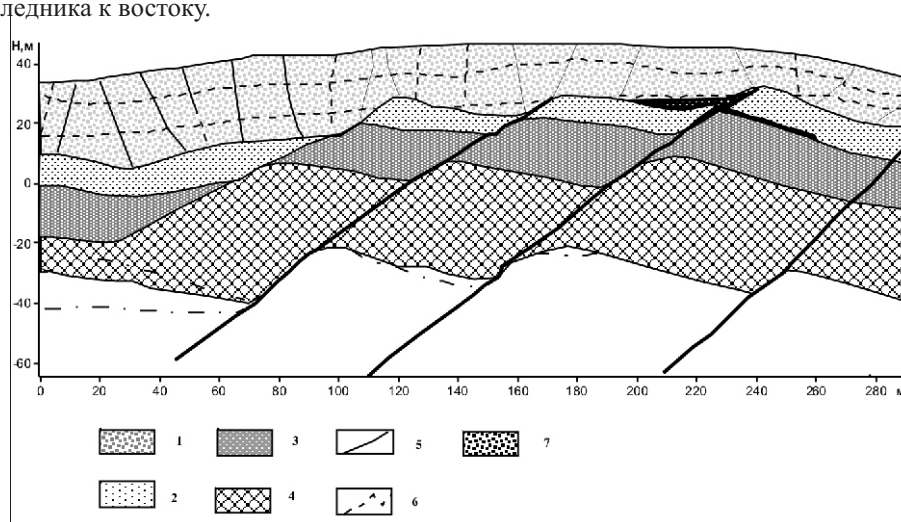


Рис. 3. Геофизический разрез через центральную часть ледника вдоль профиля А'–А. Здесь 1 – собственно ледник, 2, 3, 4 – литологические границы, 5 – разломы и трещины, 6 – фирн, 7 – водонасыщенная подложка.

На разрезе хорошо видны нижняя граница ледника и сложная система разломов в леднике (трещины) и в земной коре. Также хорошо видны две границы раздела в самом леднике на глубинах 10 и 20 м от поверхности ледника. Обе границы достаточно точно повторяют форму поверхности ледника и частично – подстилающей поверхности. Очень похоже, что они отражают фазы формирования ледника – превращение снега в лед, т.е. фирновые поверхности. Наличие более одного фирнового слоя может быть связано с неоднородностью формирования ледника.

Трещины в леднике частично унаследовали структурные разломы подложки, а частично сформированы рельефом скал и движением ледника. Некоторые из разломов могут быть зонами напряжений и соответственно зонами образования трещин. Существуют также признаки пещер или широких трещин, обнаруженные в большинстве слоев ледника, которые находятся на пересечении трещин и горизонтальных слоев внутри льда.

Субвертикальные трещины с наклоном, перпендикулярным наклону подложки, преобладают в случае большой толщины льда. Наклон трещин возрастает с уменьшением толщины ледника. Можно предположить, что для данного ледника характерными являются два типа движения: вязко-пластическое течение и скольжение по подложке ледника. Первый тип движения преобладает в восточной части ледника (см. правую часть рис. 3), где толщина льда мала и трещины и напряженные зоны сильно наклонены. Как видно из наклона трещин, скорость верхних слоев льда больше, чем скорость нижних. Такое изменение скорости характерно для вязко-пластического течения. Субвертикальные трещины в толстом слое льда (южная часть ледника) показывают, что скорость движения льда приблизительно постоянна во всей толще льда, что более характерно для скольжения льда в целом.

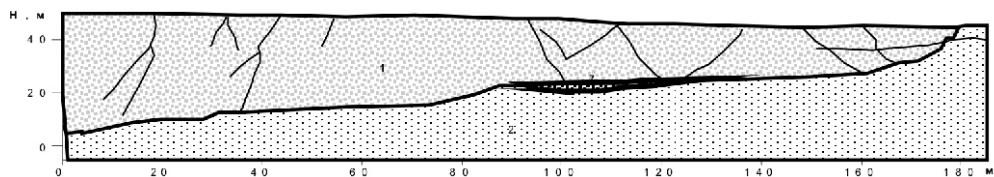


Рис. 4. Геофизический разрез через центральную часть ледника в соответствии с профилем II (обозначения совпадают с обозначениями рис. 3).

На нижней границе ледника в некоторых местах найдена жидкая вода. Наиболее достоверно следы воды замечены в юго-восточной части ледника (рис. 3, 4), где вода найдена и под ледником, и в подложке вдоль наклона геологического слоя, который достигает океана на берегу острова.

Наиболее вероятным источником воды является таяние ледника. По ложу ледника она стекает в море. Но также возможно, что вода просачивается из моря вдоль рыхлой границы геологического слоя. Водонасыщенный грунт и соответственно области уменьшенных напряжений показаны как темные пятна на карте (рис. 2, справа).

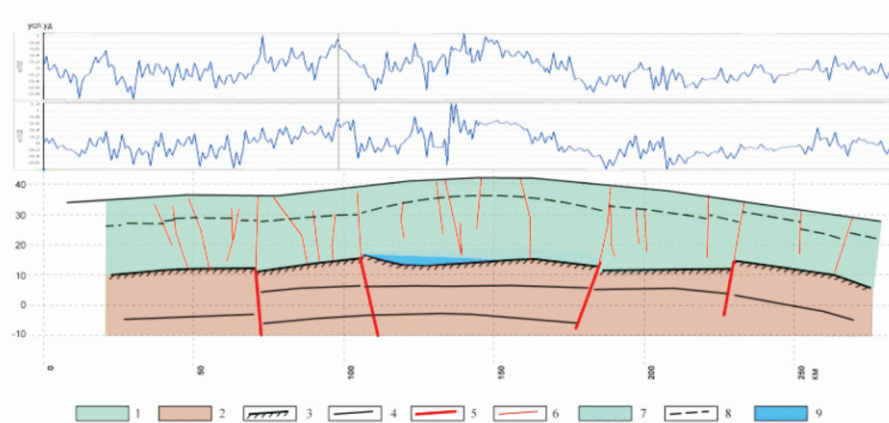


Рис. 5. Геологический разрез через центральную часть ледника вдоль профиля А'–А (съемка 2007 г.) с вейвлет-компонентами сигнала (вверху).

Здесь 1 – собственно ледник, 2, 3, 4 – литологические границы, 5 – тектонические разломы, 6 – разломы в леднике (трещины), 7, 8 – фирн, 9 – водонасыщенная подложка.

Практически тот же профиль был исследован в 2007 г. С помощью прибора «Астрогон», который является усовершенствованным вариантом «Тезея». Результат показан на рис. 5 совместно с вейвлет-компонентами сигнала (вверху рисунка). Сравнение аналогичных профилей, исследованных в разное время, может служить основой технологии мониторинга структуры и движения ледника. Эту же технологию, конечно, можно использовать и для изучения структуры земной коры [Богданов и др., 2007].

6. Заключение

Несомненно, при изучении физики геоэлектромагнитных возмущений литосферного происхождения, в частности при анализе возможных механизмов их генерации, «сверхдальнего» распространения, и исследовании возможностей их использования для

диагностики структуры геосреды и мониторинга геодинамических процессов, возникает множество сложных проблем. При этом зачастую неясно, в чем главная трудность: в математической формулировке задачи или в привлечении новых физических идей. Тем не менее именно с их решением связаны перспективы улучшить понимание электродинамических процессов в литосфере Земли.

Стало очевидным, что для решения этих задач требуются физико-математические модели нелинейных взаимодействий в системе физических полей, которые обмениваются энергией с накопленной энергией геосреды. Их адекватное описание возможно лишь посредством нелинейных уравнений, так как, находясь в рамках классических моделей континуальной механики и термодинамики сплошной среды, не удастся воспроизвести важные особенности и характеристики геомагнитного шума, регистрируемого на земной поверхности.

Известно, что эволюция нелинейных систем может осуществляться разными путями, на смену однозначности приходит возможность множественности путей развития и поведения описываемых объектов. В этом контексте несомненный интерес и актуальность представляет развитие автоволновой концепции энергетики и динамики Земли, обоснование механизмов аккумуляции, трансформации и диссипации энергии в ней.

Концептуальная новизна подхода состоит в том, что проблему генерации геоэлектромагнитного шума предлагается решать в рамках моделей распределенных возбудимых сред с учетом многообразия механоэлектромагнитных преобразований и эмпирических закономерностей, свидетельствующих о связи характеристик излучения со структурой и динамикой геосистем, которые не могут быть описаны в рамках классической теории скин-эффекта. Тем не менее, хотя многие конкретные вопросы генерации геоэлектромагнитного шума в рассматриваемом здесь диапазоне частот все еще остаются открытыми, можно констатировать появление новых идей его теоретического и феноменологического описания, способствующих становлению нового метода геоэлектрики. При этом, в отличие от классического подхода, к базовым моделям механоэлектромагнитных трансформаций отнесено переходное излучение (рассеяние) в нестационарной геосреде, генерируемое полем зарядов в волне комплексной диэлектрической проницаемости. Эта волна формируется в окрестности распространяющегося фронта концентрации флюида в геосреде или на фронте распространяющегося вдоль зоны разлома и канализируемой им «захваченной» волны (обобщенной волны Рэлея). Поляритонное излучение также может быть базовым механизмом излучения радиоволнового шума, и для доказательства важности вклада того или иного механизма необходимы детальные исследования частотных и временных характеристик излучения на основе достаточно обоснованных математических моделей.

Список литературы

Богданов Ю.А., Воронин В.И., Уваров В.Н., Черняков А.М. Электромагнитное проявление структуры недр // Геофиз. журн. – 2003. – 25, № 4. – С. 117–124.

Богданов Ю.А., Коболев В.П., Русаков О.М., Захаров И.Г. Геополяритонное зондирование газоносных структур северо-западного шельфа Черного моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2007. – 22, № 4. – С. 37–61.

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., Павлович В.Н. Неравновесное излучение земной коры – индикатор геодинамических процессов // Геофиз. журн. – 2008. – 30, № 4. – С. 12–24.

Вавелюк Ю.П., Яновская Т.Б. Моделирование процессов подготовки землетрясений в системе литосферных блоков // Физика Земли. – 2000. – № 6. – С. 4–13.

Васильев В.А., Романовский Ю.М., Яхно В.Г. Автоволновые процессы. – Москва: Наука, 1987. – 240 с.

Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. – Москва: Мир, 1973. – 280 с.

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.

Гульельми А.В. Уравнение генерации сейсмомагнитных сигналов // Докл. РАН. – 1995. – 342, № 3. – С. 390–392.

Гульельми А.В. Проблемы физики геоэлектромагнитных волн (обзор) // Физика Земли. – 2006. – № 3. – С. 3–16.

Гульельми А.В. Ультранизкочастотные волны в коре и в магнитосфере Земли // Успехи физ. наук. – 2007. – 177, № 12. – С. 1257–1276.

Гульельми А.В. Инерционные эффекты в коре и в магнитосфере земли // Физика Земли. – 2008 а. – № 1. – С. 50–56.

Гульельми А.В. Нелинейность геоэлектромагнитных волн // Геофиз. исследования. – 2008 б. – 9, № 3. – С. 16–24.

Гуфельд И.Л., Собисевич А.Л. Импульсная региональная дегазация Земли, стимулирующая образование очагов сильных землетрясений // Дегазация Земли: геофлюиды, нефть и газ, парагенезисы в системе горючих ископаемых. Тез. Междунар. конф. (Москва, 30 мая–1 июня 2006 г.). – Москва: ГЕОС. – 2006. – С. 92–94.

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. Всеросс. конф. (Москва, 22–25 апреля 2008 г.). – Москва: ГЕОС, 2008. – С. 146–148.

Давыдов В.А., Зыков В.С., Михайлов А.С. Кинематика автоволновых структур в возбудимых средах // Успехи физ. наук. – 1994. – 161, № 8. – С. 45–86.

Даниленко В.А. К теории движения блочно-иерархических геофизических сред // Докл. АН Украины. – 1992. – № 2. – С. 87–90.

Дмитриевский А.Н. Автоволновые процессы формирования флюидонасыщенных зон Земли. // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы. Матер. Всеросс. конф. (Москва, 22–25 апреля 2008 г.). – Москва: ГЕОС, 2008. – С. 6–8.

Дмитриевский А.Н., Володин И.А. Формирование и динамика энергоактивных зон в геологической среде // Докл. РАН. – 2006. – 411, № 3. – С. 395–399.

Дмитриевский А.Н., Володин И.А. Автосолитонные механизмы дегазации Земли // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы. Матер. Всеросс. конф. (Москва, 22–25 апреля 2008 г.). – Москва: ГЕОС, 2008. – С. 152–154.

Дмитриевский А.Н., Гридин В.И. Инновационные технологии системно-геодинамического моделирования газоносных территорий // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы. Материалы Всероссийской конференции. (Москва, 22–25 апреля 2008 г.). – Москва: ГЕОС, 2008. – С. 154–157.

Додд Р., Эйблек Дж., Норрис Х. Солитоны и нелинейные волновые уравнения. – Москва: Мир, 1988. – 692 с.

Дубровский В.А., Сергеев В.Н. Кратко- и среднесрочные предвестники землетрясений как проявление нестабильности скольжения вдоль разломов // Физика Земли. – 2006. – № 10. С. 11–18.

Кернер Б.С., Осипов В. В. Автосолитоны. – Москва: Наука, 1991. – 197 с.

Левшенко В.Т. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы литосферного происхождения: Автореф. дисс. ... д-ра физ.-мат. наук ОНФЗ РАН. – Москва: 1995. – 36 с.

Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. Пер. с англ. – Москва: Институт компьютерных исследований, 2002. – 645 с.

Меньшиков Л.И. Сверхизлучение и некоторые родственные явления. – Успехи физ. наук. – 1999. – 169, № 2. – С. 113–154.

Неновски П.И., Бойчев Б.В. Механизмы возникновения сейсмоэлектрических сигналов в земной коре // Геомагнетизм и аэрономия. – 2004. – № 4. – С. 545–553.

Садовский М.А., Деншиков В.А., Кондратьев В.Н., Романов А.Н., Чубаров В.М. О модели верхних слоев земной коры // Физика Земли. – 1982. – № 9. – С. 3–9.

Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. – Москва: Наука, 1991. – 96 с.

Солитоны / Под ред. Р. Буллафа, Ф. Кодри. – Москва: Мир, 1983. – 408 с.

Старостенко В.И., Даниленко В.А., Венгрович Д. Б., Кутас Р.И., Стифенсон Р.А., Стомба С.Н. Моделирование эволюции осадочных бассейнов с учетом структуры природной среды и процессов самоорганизации // Физика Земли. – 2001. – № 12. – С. 40–51.

Стаховский И.Р. Самоподобная сейсмогенерирующая структура земной коры: обзор проблемы и математическая модель // Физика Земли. – 2007. – № 12. – С. 35–47.

Сурков В.В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. – Москва: Изд. Моск. инж.-физ. ин-та, 2000. – 235 с.

Фракталы в физике / Под ред. Л. Пьетронеро, Э. Тозатти. Пер. с англ. – Москва: Мир, 1988. – 670 с.

Шуман В.Н., Причепий Т.И. Оптимальные режимы электромагнитных зондирующих систем с контролируемым возбуждением поля в изотропных средах с дисперсией // Геофиз. журн. – 2004. – 26, № 4. – С. 55–62.

Шуман В.Н. Электромагнитные сигналы литосферного происхождения в современных наземных и дистанционных зондирующих системах // Геофиз. журн. – 2007. – 29, № 2. – С. 3–16.

Шуман В.Н. Уравнение генерации спонтанных электромагнитных сигналов в системе литосферных блоков // Геофиз. журн. – 2008. – 30, № 1. – С. 42–48.

Шуман В.Н., Богданов Ю.А. Импульсное электромагнитное излучение литосферы: спорные вопросы теории и полевой эксперимент // Геофиз. журн. – 2008 а. – 30, № 2. – С. 32–41.

Шуман В.Н., Богданов Ю.А. Электромагнитная эмиссия литосферы: пространственная структура и возможные механизмы генерации // Геофиз. журн. – 2008 б. – 30, № 6. – С. 39–50.

Bak P., Tang C. Earthquakes as self-organized criticality // J. Geophys. Res. – 1989. – 94, № 15. – P. 635–637.

Gershenson N., Bambakidis G. Modeling of seismo-electromagnetic phenomena // Russian J. Earth Sci. – 2001. – 3, № 4. – P. 247–275.

Li Y.-G., Leary P.C., Aki K., Malin P.E. Seismic Trapped Modes in Oroville and San Andreas Zones // Science. – 1990. – 249. – P. 763–766.