

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ЭМИССИЯ ЛИТОСФЕРЫ: НОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ

© В.Н. Шуман, 2010

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина

Discussed in the paper is the problem of generation and propagation of electromagnetic signals that have a lithospheric origin. Attention is concentrated on electrodynamics of geological medium – open dissipative seismic-electromagnetic generating system – and in particular on the methods of its description, on interaction between radiation and substance. Some mathematical aspects of generation of electromagnetic disturbances in radio-wave range are being analyzed. The article shows possible ways of application of electromagnetic component of lithosphere emission for the diagnostics of its structure and geodynamic processes in it. Some experimental results on registration of spontaneous electromagnetic emission of lithosphere are given.

Keywords: electromagnetic disturbances, mechanic-electromagnetic transformations, geological medium, seismic-electromagnetic generating structure, autowave transfer mechanism.

Введение. Проблема изучения электромагнитных сигналов литосферного происхождения, их роль и место в структуре электромагнитного поля Земли остаются актуальными и привлекают внимание исследователей на протяжении длительного времени. Исходные представления о генерации электромагнитных сигналов в земной коре, предложенные А.А. Воробьевым [10] еще в 1950–1970-е годы, в дальнейшем получили развитие в работах многих авторов (см., например: [5, 6, 15, 37–39] и цитируемую там литературу). Теоретические разработки сопровождались обширными экспериментальными лабораторными и полевыми измерениями.

Установлено, что генерация электромагнитного излучения в земной коре может происходить как вынужденно, вследствие подвижек горных пород при сейсмическом воздействии, так и спонтанно, вне прямой связи с проявлением сейсмичности [14, 21, 28, 30]. При этом частотный спектр излучения, регистрируемого на земной поверхности, весьма широк – от 10^{-4} до 10^6 Гц и выше, причем в области радиочастот 1–100 кГц и выше оно имеет импульсный характер, а более низкочастотные поля по морфологии существенно отличаются от высокочастотных. Стало очевидным, что в широком смысле вопрос о природе электромагнитного излучения литосферного происхождения является фундаментальным. В этой связи наряду с натурным экспериментом большое внимание уделялось лабораторным исследованиям процессов генерации электромагнитных сигналов при ударном сжатии и разрушении твердых тел (образцов горных пород и минералов) [30, 39]. В част-

ности, в процессе лабораторных экспериментов при динамическом деформировании и разрушении образцов пород установлены такие эффекты, как генерация низкочастотных электромагнитных полей (в основном радиодиапазона), эмиссия заряженных частиц (электронов) с энергиями до 100 кэВ, выход ионов, рентгеновское излучение, микроразряды в трещинах [30]. Эксперименты по ударному сжатию образцов засвидетельствовали скачок потенциалов на фронте ударной волны. В магнитных материалах возникают эффекты их ударного намагничивания и размагничивания. Быстрое сжатие пород при распространении ударной волны по пористому веществу сопровождается появлением сильных электрических полей [30].

Установлено, что электромагнитные импульсные возмущения появляются синхронно с акустической эмиссией разрушаемого образца. Так, в некоторых работах утверждается, что электромагнитные возмущения более интенсивны на ранних стадиях разрушения, в то время как акустическая эмиссия увеличивается к моменту его полного разрушения¹. При этом спектр электромагнитных возмущений, генерируемых при разрушении, достаточно широк – от 10 кГц до 1 МГц, а максимум интенсивности приходится на диапазон 1–50 кГц [30].

Установлено также, что в некоторых случаях акустический и электромагнитный импульсы обусловлены одной и той же причиной – быстрым (1–100 мкс) ростом отдельных микротрещин отрыва [30].

Большое внимание исследователи уделяли также изучению электромагнитных эффектов,

¹ По известным мотивам (см., например: Ванштейн Л.А. Распространение импульсов // Успехи физ. наук. – 1976. – Т. 118, вып. 2. – С. 339–367) в дальнейшем вместо термина “сигнал” (переносчик информации; импульс с фронтом) будем преимущественно пользоваться термином “импульс” (импульс с голоморфной (аналитической) комплексной огибающей не есть сигнал в собственном смысле этого слова, поскольку такой импульс бесконечен во времени и лишен элемента внезапности) или более нейтральным – “возмущение”.

связанных с распространением в земной коре сейсмических волн (косейсмических явлений, сопутствующих распространению сейсмических волн) [14, 15, 28, 30]. Предполагается, что электромагнитные возмущения, регистрируемые на поверхности Земли, обусловлены двумя причинами: сейсмоэлектрическими явлениями, связанными с электрокинетическим эффектом в пористых влагонасыщенных средах, и возмущениями геомагнитного поля при движении проводящих горных пород за фронтом сейсмической волны во внешнем геомагнитном поле. Однако сильное поглощение микросейсмических, а особенно электромагнитных возмущений радиоволнового диапазона на трассах распространения в земной коре порождает известные проблемы при попытках переноса результатов лабораторных опытов на реальную геосреду [37, 38].

Как известно, высокочастотная составляющая спектра электромагнитного излучения в реальной геосреде не может выйти на земную поверхность из областей генерации, глубина которых превышает мощность скин-слоя на этих частотах. В приповерхностных же горизонтах земной коры проблематично найти источники радиоэмиссии, а еще труднее связать ее с процессами, происходящими на глубине (в частности, с процессом подготовки сейсмического события). С такой точки зрения кажется естественным скепсис многих исследователей в отношении возможной связи интенсивности радиоизлучения килогерцового и, тем более, мегагерцового диапазонов с процессами, происходящими в очаге будущего сейсмического события. По этой причине интересы исследователей сосредоточились на диапазоне от долей герца до нескольких герц, относящихся к центральной части полосы частот сейсмологических сигналов [14, 15, 28]. Мощность скин-слоя в данном случае становится сопоставимой с глубиной возможного очага, и выход электромагнитного излучения на земную поверхность физически реален.

Высокочастотные упругие колебания также подвержены сильному поглощению средой, и их обнаружение на земной поверхности, по мнению М.А. Садовского [27], свидетельствует о том, что они, очевидно, генерируются рассредоточенно во всем объеме литосферы. При этом было бы естественным считать колебания геосреды в различных спектральных областях собственными колебаниями составляющих ее блоков. Иначе говоря, реальная среда ведет себя подобно набору резонаторов. Этим и объясняется появление отчетливо выраженных максимумов наблюдаемых спектров на частотах $f_k = v_k/L_k$, где L_k – преимущественный размер блока; v_k – скорость звука в нем.

Становится все более очевидным, что адекватная формализация процесса генерации спонтанной электромагнитной эмиссии и механиче-

ских вибраций нуждается в качественно новых моделях геосреды, которые позволили бы анализировать пространственно-временную структуру микросейсмических и электромагнитных колебаний и ее связь со структурой и динамикой геосреды. Естественно также считать, что описание механических вибраций и электромагнитного фона литосферного происхождения невозможно без учета структурных свойств среды и ее особенностей. Тем не менее профессиональные приемы и применяемый в исследовании этих проблем аппарат все еще довлеют над адекватностью подхода к столь сложным явлениям, а ограниченность экспериментальных данных неизбежно ведет к схематизации и ограниченности теоретических моделей.

Рассмотрению указанного круга проблем с акцентом на новые экспериментальные данные и посвящено дальнейшее изложение. Заметим, что часть этих данных уже отражена в ряде публикаций, другие еще не получили должного освещения. Внимание концентрируется на вопросах, ответы на которые не так очевидны и дискуссионны, таким образом, дополняется анализ состояния исследований проблемы, включая и некоторые смежные.

Разумеется, предлагаемая концепция не является постулатом и поэтому может и должна меняться, корректироваться и дополняться при появлении новых экспериментальных данных и теоретических воззрений. Можно надеяться также на преодоление тенденции к замыканию геоэлектрики в кругу собственных проблем, тормозящих ее интеграцию с сейсмологией, геомеханикой и геологией.

Геосреда и глобальный механизм генерации сейсмоэлектромагнитной эмиссии. Как уже упоминалось, к фундаментальным свойствам геосреды относится ее строение [16, 27]. Она состоит из множества различных по размерам блоков, перемещающихся как единое целое и взаимодействующих в процессе перемещения. Основная особенность такой среды – иерархическое распределение по размерам ее элементов. Взаимодействие блоков, включающее в себя процессы дробления, деформации и пластического течения отдельных частей, зацепления механической и физико-химической природы, происходит, в основном, по их границам. Геосреда непрерывно подвергается действию разномасштабных внутренних и внешних сил: на нее постоянно действуют флуктуационные и периодические возмущения, создавая в совокупности шумовое поле (приливы, метеофакторы, упругие волны местной и отдаленной сейсмичности, тектоническая деформация, вариации скорости вращения Земли и другие факторы). Геосреда может находиться в разных метастабильных состояниях с несколькими положениями равновесия. В ней постоянно меняются физико-химические и

физико-механические свойства и параметры контактного взаимодействия внутри блоков и в граничных структурах вследствие вариаций восходящих потоков легких газов. Полагают, что именно восходящие потоки легких газов могут быть основным переменным фактором, контролирующим текущую неустойчивость литосферы и стимулирующим обмен энергией между ее отдельными элементами [16].

Глубинный флюид представляет собой сложную открытую, энергетически концентрированную динамическую систему, постоянно меняющую свой состав и свойства. Полагают [16], что выше границы Мохо легкие газы H_2 , He растворены во флюиде и твердой фазе и их восходящий поток обусловлен градиентами напряжений и температуры. Ниже этой границы поток легких газов может осуществляться только через твердую фазу в результате диффузии. Заметим, что во флюиде растворена смесь газов – H_2 , He , N_2 , CO , CO_2 , CH_4 и др. Но наибольшую вероятность перейти в твердый раствор имеют водород и гелий.

Следствием взаимодействия восходящих переменных потоков легких газов с твердой фазой являются вариации объемов элементов среды и нарушение их аккомодации между собой и блоками. При этом кинетика изменений объемов элементов твердого тела и, соответственно, вариации объемно-напряженного состояния среды зависят от парциального давления легких газов во флюиде и твердой фазе. При выходе газов из кристаллических структур или их коагуляции внутри структур в порах происходит восстановление параметров структур, т. е. возвращение к “исходному” состоянию.

Рассматривают три основных процесса, обуславливающих неустойчивость литосферы при прохождении через нее легких газов: формирование пористости с высоким внутренним давлением газов, междоузельную диффузию, фазовые переходы по высокотемпературному типу в присутствии гелия. При этом в условиях взаимодействия с непрерывным и переменным потоком восходящих легких газов твердая фаза среды будет испытывать макроскопические деформационные эффекты [16]. Приведенные соображения имеют экспериментальное обоснование: при имплантации в образцы горных пород водорода и гелия в концентрациях, соответствующих реальным в литосфере, их деформация достигала величин 0,01–0,06, что превышает значения предельных разрушающих деформаций литосферы – 0,0001 [16].

Таким образом, постоянно действующий фактор, имеющий общепланетарный характер, это процессы непрерывного взаимодействия выходящих потоков легких газов H_2 и He с твердой фазой литосферы, при котором меняются объемы элементов среды, что приводит к несинхронным

вариациям ее объемно-напряженного состояния. В итоге литосфера является активной, открытой и неравновесной системой, в которой ее параметры непрерывно меняются. При этом отдельные объемы литосферы характеризуются собственными режимами вариаций параметров среды. Существенно, что весьма быстрая изменчивость скоростных параметров среды прямо указывает на наличие процессов, влияющих именно на параметры кристаллических структур [16].

Как известно [18], энергетическая накачка такой среды способствует формированию активных систем, характеризующихся нелинейной динамикой физических полей и автоволновыми механизмами переноса флюидов. При дополнительном поступлении энергии в геосреду в таких системах могут возникать статические, пульсирующие или бегущие области концентрации флюида. Режимы, типичные для активных сред: автоволны, волны переключения и пики; их адекватное описание возможно лишь посредством нелинейных уравнений [2, 17].

Напомним, что под автоволнами подразумевают пространственно-локализованные импульсы, которые распространяются с постоянной скоростью без существенного изменения своей формы. Эти уединенные состояния в таких системах называют также автосолитонами, чем подчеркивается тот факт, что форма, амплитуда, скорость распространения, частота пульсаций автоволн не зависят от начального возмущения и определяются параметрами системы. Обычно автоволны имеют резко очерченные границы, что делает их нелинейными резонаторами. Наличие флюида – основной фактор их существования. Автоволны взаимодействуют между собой. При этом малые возмущения в системе затухают, в то время как “выживает наиболее устойчивая и простая геометрически конфигурация со стоячими «волнами»” [31]. Генерируемые и излучаемые из таких областей геосреды сейсмоакустические и электромагнитные возмущения и регистрируются на земной поверхности. Как известно, и сейсмический процесс, и процессы механоэлектромагнитных преобразований реализуются преимущественно по границам блоков и разломных зон, где проявляется активная циркуляция флюидной фазы, а также восходящих и переменных потоков легких газов глубинного происхождения, следствием чего являются непрерывные и быстрые изменения параметров геосреды в блоковых и граничных структурах. Характерная особенность данных процессов в предельно энергонасыщенной среде, как уже упоминалось, – их неустойчивость. Поэтому точный долгосрочный прогноз для подобных явлений, по мнению М.А. Садовского, В.Ф. Писаренко и др., невозможен: иногда даже сколь угодно детальное знание состояния принципиально дис-

кретной системы не дает основания для однозначного предсказания будущего ее поведения. В частности, дискретный шаг может пройти точку бифуркации решения. Причем влияние обычно пренебрегаемых при рассмотрении подобных процессов малых эффектов может стать определяющим, и невозможно предсказать, какая из его ветвей реализуется в будущем. Но при этом в подобных системах возможно также формирование упорядоченных структур, поведение которых уже, в принципе, поддается прогнозированию.

Сосредоточим далее внимание на самих механизмах генерации электромагнитных сигналов в рассматриваемой системе. Как отмечалось выше, постоянно действующий планетарный фактор — это процесс непрерывного взаимодействия восходящих потоков легких газов с твердой фазой литосферы, при которых меняются объемы различных элементов геосреды, что приводит к несинхронным вариациям объемно-напряженного состояния среды. При этом кинетика изменений объемов ее элементов и, соответственно, вариации объемно-напряженного состояния будут зависеть от парциального давления легких газов во флюиде и твердой фазе. Вследствие высокой подвижности легких газов происходит увеличение периодов кристаллической решетки вещества земной коры (увеличение ее объема), а последующий захват междоузельных атомов гелия и водорода и образование растворов замещения сопровождаются уменьшением периодов решетки [16]. Но, как известно, большая часть возникающих напряжений релаксирует вследствие рождения и последующего движения различного типа дефектов кристаллической структуры, а каждый акт рождения дефекта и каждый элементарный акт движения дефектов сопровождается возбуждением колебаний кристаллической решетки, как акустических, так и оптических. На этой основе в работе [4] предложен нелинейный механизм усиления электромагнитных волн при их взаимодействии с дефектами кристаллической решетки вещества земной коры, позволяющий понять некоторые особенности электромагнитного излучения, в частности, его дальнего распространения. Разумеется, такие выводы соответствуют случаю распространения электромагнитных волн в кристаллах в области прозрачности.

По существу, этот механизм усиления электромагнитных волн при их взаимодействии с дефектами кристаллической решетки вещества земной коры, находящейся в неравновесном состоянии, очень близок к механизму сверхизлучения Дикке [22]. Его суть сводится к коррелированному взаимодействию осцилляторов с полем, приводящим к возникновению синфазного колебания излучателей и резонансного взаимодействия со средой [5].

Возможен и другой, макроскопический, подход к проблеме генерации и распространения электромагнитного шума [5, 37, 38]. Неравновесность, нелинейность, неустойчивость, реальная структура геосреды — основные предпосылки, на которых он основан. Как уже упоминалось, в этих условиях в геосреде на энергетических потоках из земных недр возможно распространение фронта концентрации флюида (возникновение статических, пульсирующих и бегущих областей его концентрации) или потока легких газов и связанных с ним быстрых вариаций таких физических и физико-механических параметров геосреды, как скорость распространения возмущений, диэлектрическая проницаемость, проводимость и др. В частности, в окрестности распространяющегося фронта концентрации флюида (потока легких газов) возможно формирование “волны” комплексной диэлектрической проницаемости [5, 37, 38] и, соответственно, генерации переходного рассеяния [11].

Напомним, что переходным рассеянием называют переходный процесс в нестационарной среде. Его можно рассматривать как процесс рассеяния (трансформации) возмущения или импульса (“волны”) комплексной проницаемости при его падении на отдельные заряды, сгустки зарядов, электрических диполей и других рассеивателей, содержащихся в геосреде (или появляющихся в ней в процессе ее деформирования) с образованием электромагнитных, а в принципе, и других волн [11, с. 193].

Важное свойство переходного излучения — его узкоугловая направленность.

Заметим, что, как свидетельствует эксперимент, отдельно взятые элементы (объемы) литосферы отличаются собственными характерными режимами вариаций параметров среды. При этом, как подчеркивается в некоторых работах, на различных масштабных уровнях литосферы идет непрерывный процесс реорганизации ее структуры и каждый уровень влияет на смежные, создавая таким образом весьма сложные физико-химические поля [16].

Таким образом, процессы генерации и распространения спонтанного электромагнитного шума следует рассматривать как составную часть физики взаимодействия в геосреде — активной нелинейной, изменяющейся во времени системе — сейсмических, гидродинамических, физико-химических, электромагнитных и тепловых полей.

Некоторые экспериментальные результаты. Сосредоточим далее внимание на некоторых экспериментальных результатах по регистрации спонтанной электромагнитной эмиссии литосферы, полученных в последние годы ООО “Юг-нефтегазгеология”, важных с точки зрения дальнейших приложений и опубликованных лишь разрознен-

но и частично [5, 6, 29]. Это представляется особенно актуальным, если учесть, что многие конкретные вопросы, относящиеся к трактовке механизмов механоэлектромагнитных преобразований, структуре и особенностям пространственного распределения интенсивности излучения и его распространения все еще остаются открытыми и требуют дальнейшего изучения. Известно, что в подобных случаях решающее слово принадлежит эксперименту. И такой эксперимент активно ведется [6, 29].

Для регистрации электромагнитной эмиссии Земли в ООО «Юг-нефтегазгеология» разработан новый измерительный комплекс «Астрогон» [6]. В его состав входят: регистратор электромагнитной эмиссии, приемник GPS и интерфейсный адаптер, обеспечивающий высокую технологичность и автономность проведения измерений.

Регистратор измеряет интенсивность импульсного потока, отображающего количество импульсов электромагнитного излучения в единицу времени (обычно 1 с) с амплитудой выше заданного порога (обычно выше 5 мкВ). В качестве первичного преобразователя используется встроенная антенна, состоящая из трех взаимно перпендикулярных катушек индуктивности. На основе современной элементной базы и цифровой обработки 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) [6].

На рис. 1 показан характерный вид непрерывной записи активности электромагнитного излучения, полученной с помощью прибора «Астрогон» за время наблюдений с 12.03 по 22.03.08 г. на стационарной станции в Турции (район Анатолийского разлома). Прослеживается суточный ход изменений интенсивности излучения (коли-

чество импульсов за заданный интервал времени (1 с)), осложненный помехами разного рода – ионосферными, магнитосферными, атмосферными, техногенными и др. При этом нет четкой корреляции его значений со временем максимальной грозовой активности доминирующих мировых центров гроз: Азиатского, Африканского, Южно-Американского.

Рис. 2 иллюстрирует изменение интенсивности радиоизлучения вдоль профиля «Эталонный Шебелинский» (компонента X); модель глубинного строения получена по данным аэроэлектромагнитных наблюдений с помощью метода анализа спонтанной электромагнитной эмиссии Земли (АСЭМЭЗ). На рис. 3 представлена карта интенсивности излучения на одном из участков Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ).

На рис. 4 показано изменение интенсивности излучения вдоль профиля на шельфе Черного моря (корабельная съемка прибором «Астрогон», мощность водного слоя около 90 м) [3].

На рис. 5 представлены результаты многократных наблюдений интенсивности излучения вдоль профиля Хутояров – Базалеевка (ДДВ) длиной около 6 км. Видна корреляция отдельных реализаций не только в общей картине изменения интенсивности излучения вдоль профиля, но и в деталях. Это свидетельствует о том, что для выбранного времени выполнения наблюдений (первая половина и середина дня) вклад источников литосферного происхождения оставался определяющим. Отсюда следует важный методический вывод – интенсивность спонтанной электромагнитной эмиссии литосферного происхождения обладает упорядоченной пространственной структурой, тесно связанной со строением геосреды (в частности, с топологией межблочного пространства и геометрией самих блоков, составляющих среду) и, очевидно, ее динамикой [4–6, 29].

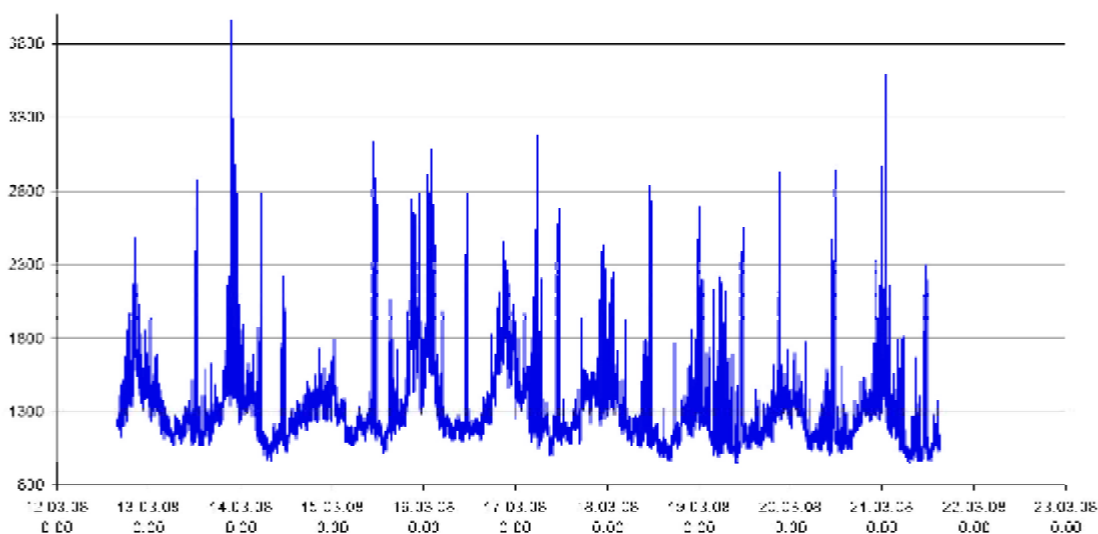


Рис. 1. Вид непрерывной записи активности электромагнитного излучения за время наблюдений с 12.03 по 22.03.08 г. на стационарной станции в районе Анатолийского разлома (Турция)

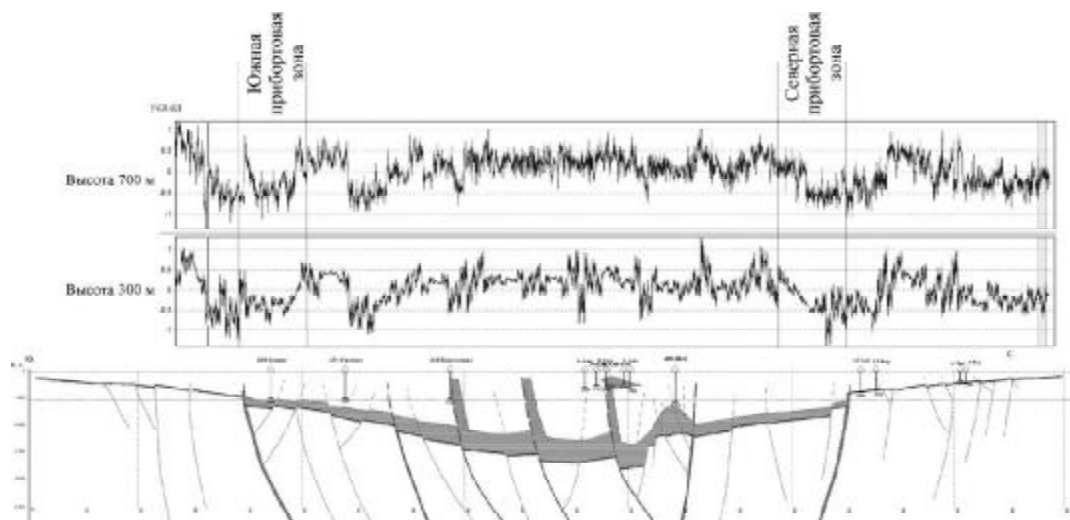


Рис. 2. Изменение интенсивности радиоизлучения вдоль профиля “Эталонный Шебелинский” (компонента X), зарегистрированного с летательного аппарата на высоте 300 и 700 м, и модель глубинного строения, полученная по данным аэроэлектромгнитных наблюдений

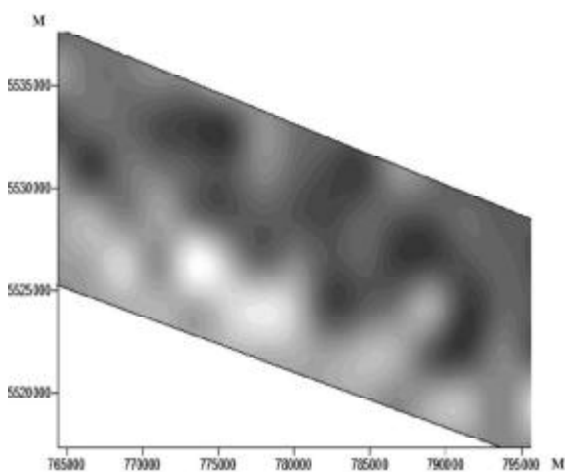


Рис. 3. Карта интенсивности радиоизлучения на одном из участков Днепровско-Донецкой впадины

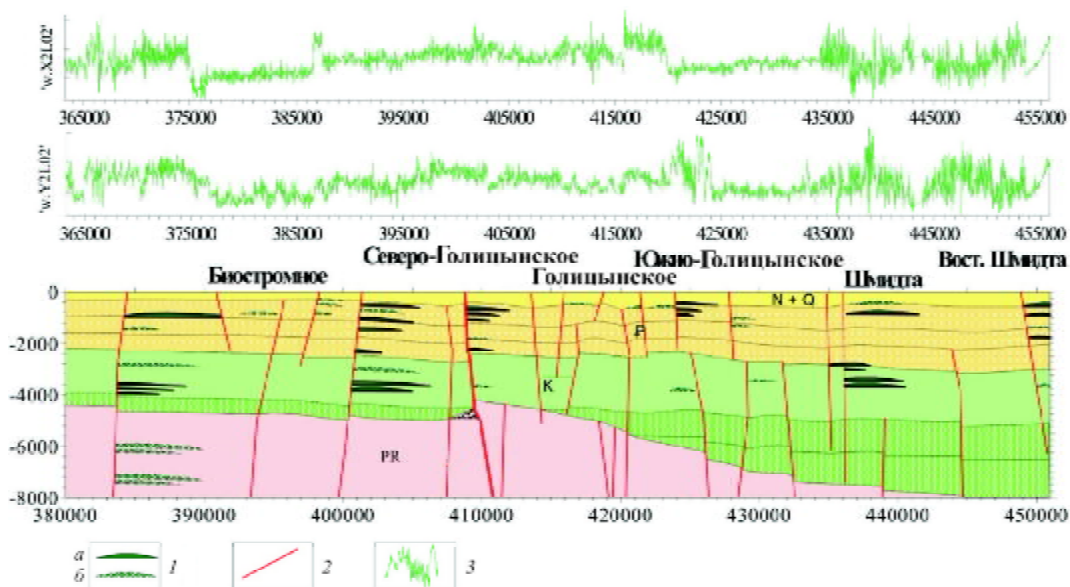


Рис. 4. Изменение интенсивности излучения (компонента X – вдоль профиля, компонента Y – перпендикулярно к нему) вдоль профиля на шельфе Черного моря [3]: 1 – залежи углеводородов (a – установленные, б – предполагаемые); 2 – тектонические нарушения, 3 – графики распределения сигнала

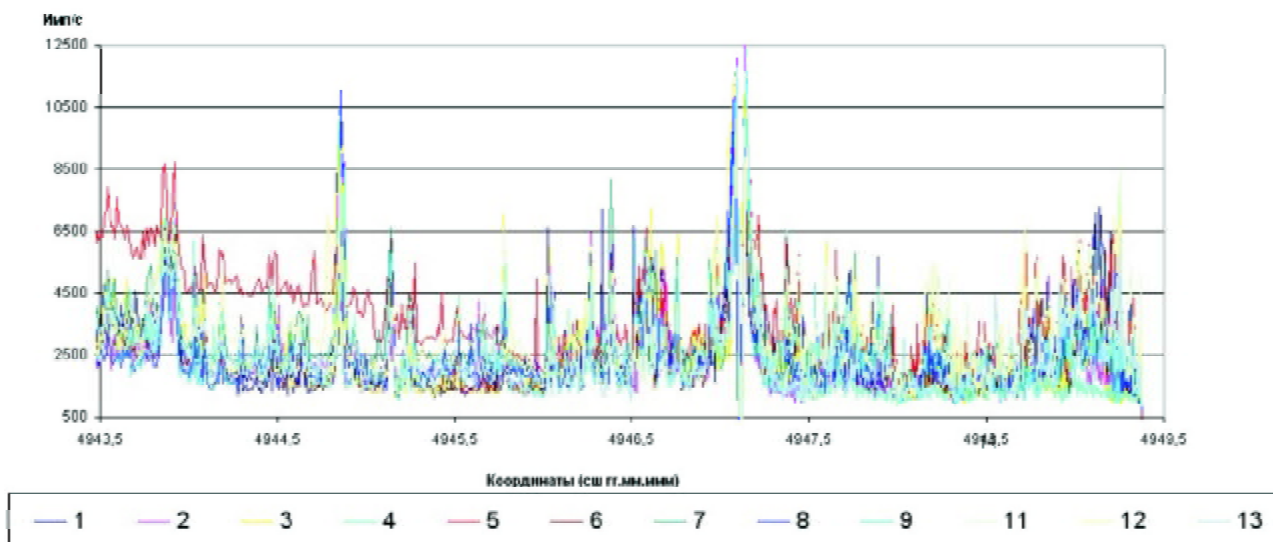


Рис. 5. Результаты многократных (13 реализаций) наблюдений интенсивности излучения вдоль профиля Хутояров – Базалеевка

Другой важный вывод, вытекающий из приведенных экспериментальных данных, — следует различать детерминированный хаос и хаотический порядок. Первый именуется динамическим хаосом, второй — самоорганизацией. Напомним, что хаотическое поведение характерно для большинства нелинейных систем.

Не менее существен также вывод о необходимости разработки новой электродинамической модели геосреды, учитывающей современный уровень знаний о самоподобной эволюции вещества земной коры и взаимодействия излучения и вещества в ней. Избранным аспектам этих проблем и посвятим дальнейшее изложение, систематически обращаясь к приведенным здесь экспериментальным данным.

Электродинамика сред и флуктуационные электромагнитные поля. Как известно, основу электродинамики материальных сред составляют микроскопические уравнения Максвелла, справедливые всегда, когда справедлива сама классическая теория поля, а получающаяся на их основе путем усреднения по ансамблю макроскопическая система уравнений Максвелла и следствия из них являются предметом изучения электродинамики сред [7].

История исследования флуктуационных электромагнитных полей, представляющих собой часть фундаментального явления в природе — броуновского движения, составляет важную часть современной физической теории и хорошо известна [9]. В частности, к настоящему времени достаточно детально развита корреляционная теория свойств тепловых электромагнитных полей, индуцированных нейтральными макроскопическими телами. В ее основе лежит фундаментальная теорема теории вероятностей — центральная предельная теорема [26]. Обычно под этим названием понимают совокупность теорем различной степе-

ни общности и применимости, которые позволяют ответить на вопрос о том, как распределена сумма независимых случайных величин.

Разумно предположить, что источник теплового электромагнитного поля — макроскопическое тело — условно можно разделить на независимо излучающие элементарные объемы и что все условия центральной предельной теоремы будут выполнены. Иначе говоря, модель предполагает, что источник термостимулированного флуктуационного электромагнитного поля представляет собой набор независимых излучателей, испускающих волны со случайными амплитудами, фазой и поляризацией, причем каждый элементарный излучающий объем излучает немонохроматические волны. Результирующее поле сложным, случайным образом меняется в пространстве и времени. Стационарность процесса означает, что средняя величина случайного поля является константой и, согласно принятой модели, должна быть положена равной нулю.

Очевидно, что динамика любого электромагнитного процесса, в том числе имеющего флуктуационную природу, описывается системой уравнений Максвелла. Заметим, что макроскопические уравнения Максвелла в материальной среде могут быть представлены в разных формах. Это обусловлено в первую очередь способом определения индуцированных в ней токов [7, 9].

В частности, если ввести полную электрическую индукцию $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$ соотношением

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + 4\pi \mathbf{P}(\mathbf{r}, t),$$

учитывающим все эффекты движения зарядов и токи намагничивания, а поляризацию $\mathbf{P}(\mathbf{r}, t)$ равенством

$$\mathbf{P}(\mathbf{r}, t) = \int_{-\infty}^t \mathbf{I}(\mathbf{r}, t') dt',$$

включающим весь индуцированный в среде ток без разделения на отдельные вклады, то система уравнений Максвелла в среде примет вид

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}; \\ \nabla \times \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) &= \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{I}_{\text{ext}}(\mathbf{r}, t); \\ \nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) &= 0; \quad \nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = 4\pi \rho_{\text{ext}}(\mathbf{r}, t),\end{aligned}\quad (1)$$

где сторонние токи $\mathbf{I}_{\text{ext}}(\mathbf{r}, t)$ и заряды $\rho_{\text{ext}}(\mathbf{r}, t)$ связаны уравнением непрерывности. В этом случае вектор $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$ получил название вектора обобщенной электрической индукции.

Если же представляется более удобным разделять наведенные токи на ток свободных зарядов, ток поляризации связанных зарядов и вихревые токи намагничения, то целесообразно ввести другие по смыслу векторы электрической индукции

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + 4\pi \mathbf{P}(\mathbf{r}, t)$$

и напряженности магнитного поля

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) - 4\pi \mathbf{M}(\mathbf{r}, t).$$

В векторе поляризации среды можно учесть вклад токов свободных и связанных носителей или только вклад тока связанных носителей, выделив ток свободных носителей заряда отдельно. В этом случае вектор намагниченности среды $\mathbf{M}(\mathbf{r}, t)$ будет определять вихревые токи и система уравнений Максвелла в среде примет вид

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}; \\ \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{I}_{\text{ext}}(\mathbf{r}, t); \\ \nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) &= 0; \quad \nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = 4\pi \rho_{\text{ext}}(\mathbf{r}, t).\end{aligned}\quad (2)$$

Здесь векторы $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$ и $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ являются смешанными в том смысле, что представляют собой суммы функций плотности и вектора поля, который, в свою очередь, определяется плотностями всюду во всей области

Система (2) также содержит сторонние токи $\mathbf{I}_{\text{ext}}(\mathbf{r}, t)$. Понятие “сторонние” означает, что динамика процессов в рассматриваемой модели не влияет на какие-либо характеристики этих токов, которые могут быть обусловлены и не электромагнитными явлениями. В то же время индуцированные токи и заряды в общем случае представляют собой функционалы напряженностей полей, определяемых, в свою очередь, суммой индуцированных и сторонних токов и зарядов. При этом сторонние и индуцированные токи, а также заряды по отдельности, как и их сумма, связаны соответствующими уравнениями непрерывности,

а граничные условия (если рассматривается несколько пространственных областей с различными электродинамическими свойствами) и материальные уравнения формулируются в соответствии с конкретными особенностями решаемой задачи и моделью среды.

Напомним, что традиционно граничные условия получаются из уравнений Максвелла в результате предельного перехода [7]. Относительно материальных уравнений вопрос остается в значительной степени открытым. В частности, на основании простых представлений о внутренних процессах было предложено несколько моделей сред, причем предпочтение отдавалось случаям, важным с точки зрения радиотехнических приложений [23]. Для наиболее простых по своим свойствам сред предполагается, что уравнения, устанавливающие связи между векторами поля, линейные, их записывают в форме

$$\mathbf{D} = \hat{\epsilon} \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \hat{\mu} \mathbf{H},$$

где под $\hat{\epsilon}$ и $\hat{\mu}$, вообще говоря, следует понимать некоторые линейные операторы, которые, в частности, могут быть тензорами второго ранга, дифференциальными или интегральными операторами. В случае достаточно медленно изменяющихся в пространстве и во времени полей эти операторы сводятся к умножению \mathbf{E} и \mathbf{H} на некоторую алгебраическую (возможно тензорную) величину.

Операторы $\hat{\epsilon}$ и $\hat{\mu}$ называются соответственно операторами диэлектрической и магнитной проницаемости. Однако в большинстве случаев вмещающая среда представляет собой в целом нейтральную систему с твердой, жидкой и газообразной фазами, которая интегрально характеризуется вещественной эквивалентной проводимостью $\sigma_e = \sigma' + \epsilon''\omega$ и вещественной эквивалентной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_e = \epsilon' - \sigma''/\omega$, где комплексные параметры $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$ и $\sigma = \sigma' - i\sigma''$ вводятся в качестве коэффициентов при линейных членах разложений в степенной ряд комплексных функций, выражающих поляризованность $\mathbf{P}(\mathbf{r}, \omega)$ и объемную плотность тока свободных зарядов $\mathbf{I}(\mathbf{r}, \omega)$ через усредненные электрические и магнитные поля в рассматриваемой среде [20].

Заметим, что производимые усреднения по пространству геоэлектрических свойств среды позволяют эффективно использовать аппарат электродинамики сплошных сред, но в отдельных случаях исключают из рассмотрения ее детали, которые зачастую представляют большую значимость для практических приложений, чем описание среды в среднем с эффективными характеристиками. Однако при исчерпывающем описании реальных сред, в частности геосреды, проблема материальных уравнений может оказаться очень сложной. Но в любом случае по внутренней логике электродинамики вначале идут уравнения

Максвелла, потом материальные уравнения и только затем граничные условия, выражения для энергии и др., которые являются следствием уравнений Максвелла и материальных уравнений и потому изменяются при изменении последних [7].

Обратим внимание, что в такой сложно структурированной среде, как геосреда, в которой существуют комплексы нелинейных взаимодействий между физическими полями и ее подсистемами, вопрос о многообразии материальных уравнений остается крайне сложным. Предельно ясно, что для ее адекватной формализации уравнения Максвелла должны быть дополнены другими уравнениями в частных производных, описывающие эти процессы и взаимодействия.

О глубинной привязке областей генерации электромагнитного шума. Как отмечалось в разделе, посвященном экспериментальным результатам измерений интенсивности спонтанного электромагнитного излучения (количества импульсов за заданный интервал времени), выполненных ООО «Юг-нефтегазгеология» на серии профилей в ДДВ и других регионах, на земной поверхности и над нею наблюдается отчетливо выраженная упорядоченная пространственная структура аномалий интенсивности, тесно связанная со строением геосреды (в частности, с топологией межблочного пространства) [3, 5, 6, 29]. Примечательно, что характеристики аномалий интенсивности имеют близкие параметры от схожих геоструктур независимо от их географического расположения [3, 37, 38]. В итоге появляется принципиальная возможность восстановления элементов строения среды. С этой целью можно использовать как пространственные (размер) аномалии в суммарном сигнале (число импульсов в единицу времени, интенсивность которых превышает некий заданный или «плавающий» порог) либо его компоненты, так и их спектральные составляющие или вейвлет-преобразования [3, 29, 37, 38].

Напомним, что фоновый сейсмический процесс также реализуется преимущественно на границах блоков и разломов, где наблюдается особенно активная циркуляция активной фазы. При этом непрерывные изменения параметров геосреды в блоковых граничных структурах, отражающих изменения объемно-напряженного состояния, очевидно, могут быть связаны с периодическим изменением объемов кристаллических структур составных элементов геосреды под воздействием почти непрерывного восходящего потока легких газов [16].

Заметим, что упругие волны сильных землетрясений воздействуют на эти кристаллические структуры, что может привести к быстрому перераспределению легких газов из положения фаз внедрения во вновь образовавшиеся дефекты, ускорению их диффузии и установлению их нового

распределения, контролирующего в дальнейшем фоновую сейсмическую активность [16].

Очевидно, что вариации объемно-напряженного состояния в конкретных зонах блочных структур не синхронны и с ними связаны непрерывные изменения деформаций, электромагнитных параметров, фоновой сейсмичности, переходного рассеяния на распространяющихся фронтах концентрации флюида. С учетом множественности физических механизмов генерации электромагнитных возмущений [56, 15, 30] можно предположить, что в этих достаточно локализованных областях генерации, в принципе, возникает как бегущее, распространяющееся поле, которое в дальнейшем может существовать без источников, его породивших, так и «ближнее» квазистационарное поле, связанное с источниками. Однако свойства таких полей существенно различны. В частности, распространяющееся поле с характерным масштабом порядка длины волны быстро поглощается в среде вне частотной области ее прозрачности, в то время как у «ближнего» поля этот масштаб может быть порядка расстояния от области генерации до точки его регистрации на земной поверхности. Возможно, именно такая наиболее устойчивая и геометрически простая конфигурация со «стоячими» волнами, образованная квазистационарной компонентой поля, и определяет пространственную структуру аномалий, регистрируемую на земной поверхности или над нею [5, 6].

Для понимания связи между наблюдаемой пространственной структурой аномалий излучения и топологией межблочной структуры геосреды не менее существен экспериментально установленный факт, отмеченный еще М.А Садовским, — физико-механические и физико-химические свойства горной породы незначительно влияют на характер распределения естественной кусковатости [27, с. 334]. Возможно, именно это обстоятельство и является ключевым для понимания упомянутого выше другого экспериментального факта: пространственные характеристики аномальной интенсивности над схожими структурами подобны [3, 37, 38].

О взаимодействии излучения и вещества. Как известно, взаимодействие электромагнитного излучения со средой определяется и задается параметрами материальных уравнений, т. е. проницаемостями $\varepsilon(\mathbf{r})$, $\mu(\mathbf{r})$ и проводимостью $\sigma(\mathbf{r})$. Отметим важную методическую деталь. Иногда утверждается, что ключевым параметром для взаимодействия излучения и вещества является «показатель преломления» n , который в случае поглощающей, но немагнитной среды определяется равенством

$$\sqrt{\varepsilon} = n + i\chi,$$

где $\tilde{\epsilon}$ – комплексная диэлектрическая проницаемость.

Однако в случае существенно неоднородных сред геометрия волн задается особенностями среды, т. е. функциями $\epsilon(\mathbf{r}, \omega)$, $\mu(\mathbf{r}, \omega)$, $\sigma(\mathbf{r}, \omega)$, в то время как показатель преломления n , вообще говоря, описывает изменение фазы поля весьма частного вида – плоской монохроматической бегущей волны – и не более того [24, с. 1023].

В случае однородных сред решение уравнений Максвелла содержит линейную комбинацию всех нормальных волн, а граничные условия однозначно определяют их амплитуду. При этом, следуя [1], нормальными волнами будем называть все пропорциональные множителю $e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)}$ решения однородных уравнений Максвелла (1) или (2) с $\mathbf{I}_{\text{ext}} = 0$, $\rho_{\text{ext}} = 0$. Нормальные волны, которые могут распространяться в такой среде, весьма полно характеризуют свойства этой среды.

Волны типа $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)}$, $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)}$ с одним значением круговой частоты ω и волнового числа \mathbf{k} могут быть решением системы (1), (2) лишь тогда, когда вектор $\mathbf{D}(\omega, \mathbf{k})$ связан только с $\mathbf{E}(\omega, \mathbf{k})$ при одних и тех же значениях числа \mathbf{k} . Последнее как раз и имеет место в случае сприведливости связи

$$D_i(\omega, \mathbf{k}) = \epsilon_{ij}(\omega, \mathbf{k}) E_j(\omega, \mathbf{k}),$$

где ϵ_{ij} – тензор диэлектрической проницаемости.

Неоднородные волны естественным образом появляются при решении задач с границами раздела. В этом случае $\mathbf{k} = \mathbf{k}' + \mathbf{k}''$ и направление \mathbf{k}' определяется из закона преломления на границе раздела, а вектор \mathbf{k}'' – направлением по нормали к ней. Однако, согласно [1], с точки зрения изучения физических свойств самой среды вдали от границы раздела они особого интереса не представляют.

Рассматриваемая линейная модель в классической электродинамике сплошных сред при описании электромагнитных явлений преобладает. Полагалось, что линейного языка достаточно для понимания основных закономерностей электромагнитных процессов, хотя сами решения уравнений электродинамики в средах и отличаются исключительным разнообразием.

Трудности описания электромагнитных процессов возрастают в силу более выраженного затухания. Классические волновые представления вполне работают лишь в областях прозрачности среды, когда $|\epsilon''| \ll |\epsilon'|$, $|\mu''| \ll |\mu'|$ и диссипация электромагнитной энергии в среде за период мала по сравнению с запасенной в ней энергией.

Напомним в этой связи, что система уравнений Максвелла является гиперболической и, вообще говоря, допускает решение в виде распространяющихся волн. Однако если токи смещения оказываются пренебрежимо малыми по сравнению

с токами проводимости и ими можно пренебречь, система уравнений Максвелла становится параболической и электромагнитные волны полностью исключаются из рассмотрения.

Вероятно, это утверждение относится к волнам, описываемым линейными или квазилинейными дифференциальными уравнениями. Их отличительное свойство – существование особых поверхностей в пространстве–времени, которые в физических приложениях проявляют себя в качестве распространяющихся волн. Однако гиперболические системы уравнений поля никоим образом не охватывают всех волновых явлений, существующих в природе. В частности, известен широкий спектр задач распространения, которые не описываются гиперболическими уравнениями, но тем не менее допускают волновые явления, если понимать волны как динамические колебательные процессы в сплошной среде. Чтобы несколько прояснить изложенное, остановимся на одном частном примере.

Как известно, уравнение Бюргерса, объединяющее типичную нелинейность с типичной диффузией:

$$\frac{\partial C(z, t)}{\partial t} + C(z, t) \frac{\partial C(z, t)}{\partial z} = \frac{1}{\sigma\mu} \frac{\partial^2 C(z, t)}{\partial z^2},$$

можно свести к обычному линейному уравнению теплопроводности, описывающему чисто диссипативный способ переноса энергии:

$$\frac{\partial U(z, t)}{\partial t} = \frac{1}{\sigma\mu} \frac{\partial^2 U(z, t)}{\partial z^2},$$

нелинейной заменой [32, с. 100]

$$C(z, t) = -\frac{2}{\sigma\mu} \frac{\partial U(z, t)/\partial z}{U(z, t)}.$$

Уравнение Бюргерса – нелинейное уравнение с характеристическими скоростями $\pm\sqrt{\mu\sigma}$, определяемыми волновым оператором второго порядка. Однако если значение $1/\sigma\mu$ мало (хорошо проводящая среда), то в известном смысле хорошее приближение дает уравнение низшего порядка

$$\frac{\partial C(z, t)}{\partial t} + C(z, t) \frac{\partial C(z, t)}{\partial z} = 0,$$

которое предсказывает “волны” со скоростью распространения

$$C(z, t) = -\frac{2}{\sigma\mu} \frac{\partial C(z, t)/\partial z}{C(z, t)}.$$

При этом волны высшего порядка несут “первый сигнал” со скоростью $\pm\sqrt{\mu\sigma}$, а “основное возмущение” передается “волнами низшего порядка” со скоростью $C(z, t)$. Ясно, что, чем выше

проводимость среды σ , тем более доминируют “волны” низшего порядка.

После сделанных замечаний снова обратимся к неоднородным средам. Как уже отмечалось, в случае неоднородной среды геометрия волн задается особенностями среды, т. е. функциями $\epsilon(\mathbf{r}, \omega)$, $\mu(\mathbf{r}, \omega)$ и $\sigma(\mathbf{r}, \omega)$. Таким образом, в неоднородной среде нет распространяющихся (бегущих) волн – волны являются стоячими [24, с. 1023]. При этом колебания с длиной волн, кратной размеру неоднородностей (в частности блоков), затухают значительно слабее волн, длина которых такова, что в блоках не могут возникать стоячие волны. Иначе говоря, такая среда ведет себя подобно набору резонаторов. В подобных случаях подход к решению задач существенно зависит от соотношения длины волны λ и характерного размера L неоднородности.

В рефракционных задачах, т. е. в задачах о распространении волн в неоднородных неограниченных средах, роль отношения L/λ играет скорость изменения диэлектрической и магнитной проницаемости. Различают три характерные области:

- а) квазистатическую, когда $L/\lambda \ll 1$;
- б) резонансную, когда $L/\lambda \approx 1$; параметры среды могут изменяться быстро на расстоянии, равном длине волны;
- в) квазиоптическую, когда $L/\lambda \gg 1$; параметры среды изменяются мало на расстоянии, равном длине волны.

В этой связи представляется интересным упомянуть следующее. Выше указывалось, что особенностью геосреды является иерархически многоуровневая организация ее блочной структуры [27]. В ней нет характерного размера, и, казалось бы, использование этих характеристик (в частности, условия: “длина волны меньше характерного размера неоднородности”) применительно к сейсмике должно быть затруднительным. Тем не менее С.В. Гольдин отмечает [12], что эти условия все же работают в широком диапазоне длин волн. И далее он продолжает: “Мы (совместно с Б.Я. Гельчинским) пришли к выводу, что в таких задачах не существует модели среды, одинаковой для всех волн: волна как бы сама выбирает ту среду, в которой она распространяется в полном соответствии с упомянутым выше условием” (т. е. $\lambda \ll L$). Другими словами, несмотря на то что блочная структура геосреды проявляется на всех масштабных уровнях, ее выраженность от масштаба к масштабу может изменяться, т. е. можно говорить о преимущественно мелкомасштабной, средне- и крупноблочной среде.

Сейсмические шумы и некоторые их свойства. Согласно экспериментальным данным, сейсмические шумы (эмиссия) охватывают очень широкий диапазон частот [27]. Их исследованию по-

священа обширная литература. По частотному составу шумы условно можно разделить на низкочастотные (доли герца до первых единиц герц), высокочастотные (единицы до нескольких десятков герц) и сейсмоакустические (от десятков герц до десятков килогерц и выше). Нет и установившейся терминологии, поэтому авторы пользуются как эквивалентными следующими терминами: высокочастотные сейсмические шумы и высокочастотные микросейсм; сейсмическая и сейсмоакустическая эмиссия (излучение); сейсмоакустические и геоакустические шумы и др.

Полагают, что сейсмический шум генерируется в геосреде разломными зонами, границами контактов блоков, пористыми и трещинными коллекторами в процессе своего формирования и последующего развития под влиянием переменных полей тектонических и приливных напряжений [34]. Эти ослабленные зоны или области являются источниками постоянного когерентного излучения с шумоподобной волновой формой, энергетический спектр которой определяется параметрами этих зон и характером происходящих процессов. Когерентный эмиссионный сейсмический сигнал порождается также в процессе циркуляции флюида по каналам фильтрации и пульсаций скопленной газовой компоненты [34]. На его изучении основаны методы эмиссионной сейсмической томографии, позволяющие локализовывать как активные источники когерентного сейсмического сигнала (пассивный мониторинг), так и области интенсивного рассеяния сейсмических сигналов от землетрясений и взрывов, связанные с контрастными скоростными неоднородностями среды (дифракционная эмиссионная томография).

Установлено, что сейсмическая эмиссия, т. е. процесс излучения геосредой сейсмической энергии – процесс разномасштабный: его старшим масштабным уровням отвечают землетрясения различной энергии, а на младших масштабах проявляется в форме сейсмического шума и акустического излучения [25]. Показано, что разномасштабное сейсмическое излучение обладает трансмасштабными свойствами, т. е. его характер на различных масштабах имеет общие черты. Фундаментальная особенность сейсмического излучения – отклонение статистик процесса излучения сейсмической энергии от статистик процесса независимых испытаний [25]. И в этом его существенное отличие от рассмотренного ранее термостимулированного флуктуационного электромагнитного излучения, теория которого опирается на центральную предельную теорему [26].

Как установлено, в пространственной и пространственно-энергетических областях отклонение статистик сейсмической эмиссии от статистик процесса независимых испытаний отчетливо проявляется в существовании пространственной

структуры сейсмичности [25]. Важно, что, как и в пространственной области, сейсмическая эмиссия обладает иерархическими свойствами во временной области – параметр иерархии в ней совпадает с параметрами иерархии пространственных неоднородностей [27]. При этом есть весомые основания считать, что описание сейсмического процесса невозможно без учета структурных свойств геосреды [27]. Очевидно, назрела необходимость постановки детальных исследований иерархических свойств как сейсмической эмиссии, так и связанного с ней электромагнитного излучения. Представляется также обоснованным противопоставлять или разграничивать сейсмическую или сейсмоакустическую и электромагнитную составляющие излучения.

Математические аспекты генерации высокочастотного электромагнитного шума. Как неоднократно отмечалось (см., например: [5, 15, 30, 37, 38]), многие конкретные вопросы, относящиеся к механизмам механоэлектромагнитных преобразований и методам их математического описания, все еще остаются дискуссионными и требуют дальнейшего изучения.

Традиционно внимание концентрировалось на линейных моделях генерации. В частности, рассматривая земную кору как пористую влагонасыщенную среду, обладающую магнитной структурой и находящуюся в магнитном поле земного ядра, А.В. Гульельми предложено достаточно общее линейное уравнение генерации, единообразно описывающее возбуждение магнитного поля в результате действия четырех механизмов – пьезомагнитного, индукционного, деформационного и инерционного, с учетом таких представлений геомеханики, как ускорение, скорость, деформация и напряжение [15]. При этом предполагается, что проводимость горных пород, параметры механомагнитной трансформации, а также стороннее электрическое и магнитное поля однородно распределены в пространстве и не зависят от времени. Вместе с тем геосреда, вообще говоря, более не может рассматриваться как континуум – ей оказалась присуща внутренняя самоподобная сейсмоэлектромагнитогенерирующая структура, определяющая сейсмо- и электромагнитношумовой процесс. Концептуальная новизна такого подхода состоит в том, что проблему генерации геомагнитного шума рассматриваемого частотного диапазона предлагается решать в рамках распределенных возбудимых сред (диссипативных структур) с учетом многообразия механоэлектромагнитных преобразований и эмпирических закономерностей, свидетельствующих о связи характеристик излучения со структурой и динамикой геосистем, которые не могут быть объяснены в рамках классической теории скин-эффекта. В частности, сильное поглощение микросейсмических, а особенно элект-

ромагнитных волн радиоволнового диапазона в земной коре порождает известные проблемы: для трассы с удельной проводимостью $\sigma \approx 10^{-1} - 10^{-3}$ См/м на частотах $10^4 - 10^6$ Гц коэффициент затухания превышает $10^2 - 10^3$ дБ/км [13], и, соответственно, электромагнитные возмущения этого частотного диапазона, с точки зрения классических представлений, не могут выйти к поверхности Земли из областей генерации, глубина которых превышает мощность скин-слоя (100–150 м).

Ясно, что в этом случае на передний план выступают неустойчивые системы и возбудимые среды, демонстрирующие большое разнообразие типов поведения и самоорганизации. Импульсы, распространяющиеся в возбудимых (активных) средах, часто называют автоволновыми, подчеркивая тот факт, что их характеристики определяются, в основном, параметрами среды и практически не зависят от начальных условий. Общей теории активных сред не существует, и каждый подробно исследованный пример таких сред, как правило, демонстрирует новые типы их динамики и самоорганизации [17].

Как известно, в описании возбудимых (активных) сред общеприняты параболические уравнения (или их системы) типа “реакция–диффузия” [17]. С учетом этих обстоятельств и множественности механизмов механоэлектромагнитных преобразований в геосреде в работе [35] предложено обобщенное нелинейное уравнение генерации электромагнитных возмущений

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

где α_{ij} – матрица диффузии; B_j – индукция; $F_i(\mathbf{B})$ – нелинейная функция, определяемая динамичностью процессов деформирования возбудимой среды, характеризующаяся набором механоэлектромагнитных преобразований.

Аналізу особенностей этого уравнения, возможных путей и методов его решения посвящена работа [33]. К сожалению, однако, математическая сторона проблемы крайне сложна и нахождение даже качественного решения в этой ситуации может оказаться слишком сильным требованием. Как правило, нелинейные уравнения или их системы имеют больше чем один тип решений. Меняется и типичная постановка самой задачи: вместо явных решений упор делается на понимание поведения системы. С целью упрощения анализируемой системы в работе [33] предлагается использовать ее симметрию. Симметричный метод позволяет свести систему в частных производных параболического типа к изучению системы обыкновенных дифференциальных уравнений, для чего могут быть использованы как классический теоретико-групповой подход, так и его обобщение – метод условной инвариантности.

Заметим, что для нелинейных систем адекватным является глобальное рассмотрение. Нелинейную систему нельзя представить в виде суммы независимых частей, а ограниченная точность в ее описании имеет принципиальное значение, и даже сколь угодно детальное знание состояния системы в данный момент времени не дает однозначного предсказания ее будущего. Ясно, что в этом случае особую роль и значение приобретает вычислительный эксперимент, способствующий пониманию проблемы и выбору направлений дальнейших аналитических исследований.

Заключение. Есть весомые основания считать, что теоретическое описание широкого спектра как механических вибраций, так и спонтанных электромагнитных возмущений литосферного происхождения невозможно без учета структурных свойств геосреды. При этом действующий фактор, вызывающий их генерацию, должен быть планетарным. Согласно [16], в качестве такового может быть принята модель, в основе которой лежат представления о реакции блочной геологической среды на взаимодействие с восходящими потоками легких газов (концепция динамически неустойчивой геосреды). Очевидно, с ними может быть связана природа быстрой изменчивости физических параметров модели. Компромисс между поступающей в геосреду энергией, флюидом и ее структурой ведет к формированию статических, пульсирующих или бегущих возмущений – автоволн [18]. Организованные и излучаемые из этих областей сейсмоакустические и электромагнитные шумовые поля и регистрируются на земной поверхности. При этом сейсмичность различного ранга связана с вариациями объемов элементов геосреды (блоков) при взаимодействии нестационарных потоков легких газов (водород, гелий и др.) с твердой фазой литосферы и нарушением аккомодации между блоками (неоднородностями), а генерация электромагнитного шума на макроуровне – с переходными процессами в нестационарной среде, в частности с переходным рассеянием (излучением). Автоволны взаимодействуют между собой, и “выживает” наиболее устойчивая и геометрически простая конфигурация со стоячими волнами.

Согласно [11], любое переходное излучение можно рассматривать как процесс трансформации (рассеяния) возмущения или импульса “волны” комплексной диэлектрической проницаемости (которая может быть стоячей или бегущей, связанной с распространением фронта концентрации флюида на энергопотоках в геосреде) на неподвижных или движущихся зарядах, сгустках зарядов, электрических диполях в геосреде. Такое рассеяние коренным образом отличается от обычного, связанного с колебаниями частицы в поле падающей волны. Очевидно, сюда может быть отнесено и переход-

ное излучение, генерируемое полем зарядов в “волне” комплексной диэлектрической проницаемости, связанной с фронтами распространяющихся вдоль разлома и канализируемых им “захваченных волн” [37, 38]. Как известно, последние способны принимать энергию объемных сейсмических волн и энергию основного состояния, что означает их возможный рост по амплитуде в процессе распространения [19] и тем самым неустойчивость взаимного скольжения блоков.

На микроуровне модель генерации электромагнитного шума может быть основана на возникновении при энергетической накачке сложных кристаллических решеток и связанных с ними электромагнитных возмущений при рождении и движении точечных, линейных и объемных (микротрещины) дефектов кристаллов горных пород [4]. По существу этот механизм очень близок к механизму сверхизлучения Дикке [22]. В плотной среде сверхизлучение представляет собой коллективные волны, распространяющиеся внутри тела (блока) и на его границе превращающиеся в убегающие электромагнитные волны.

Действие упругих волн сильных землетрясений (и, возможно, процессов их подготовки) на кристаллические и межблочные структуры литосферы может привести к быстрому перераспределению легких газов, ускорению их диффузии и установлению их нового распределения, которое в дальнейшем будет определять ее фоновую сейсмическую и электромагнитную активность. В итоге структура поля микросейсмических и электромагнитных колебаний оказывается тесно связанной со строением геосреды, а интенсивность эмиссии – с ее напряженным состоянием. С этой точки зрения представляется обоснованным противопоставлять или разграничивать акустическую и электромагнитную составляющие излучения. Его активизация является основным следствием пространственно-временной импульсной дегазации Земли, контролирующей сеймотектонический процесс.

Следует указать также на возможность формирования в геосреде – активной системе – спиральных (геликоидальных) автоволн – слабозатухающих низкочастотных электромагнитных колебаний, обусловленных наличием магнитного поля земного ядра. Заметим также, что в неоднородной среде (и, следовательно, в реальной геосреде) нет бегущих (распространяющихся) волн – волны являются стоячими [24]. В итоге, как следует из изложенного выше, оказывается возможным вынос спонтанного электромагнитного шума даже килогерцового диапазона к земной поверхности со значительной глубины [5, 6, 29].

Таким образом, электродинамика самоподобной сейсмоэлектромагнитогенерирующей структуры, которой и является геосреда, оказывается тес-

но связанной с ее механикой и флюидодинамикой. Мы полагаем также, что результаты проведенных за последние годы теоретических и экспериментальных работ по регистрации спонтанного электромагнитного шума указывают на наличие нового и весьма актуального для приложений и глобального по объему работ объекта фундаментальных исследований по изучению взаимодействия электромагнитной эмиссии с геологической средой. При этом на вопрос о том, как следует оценивать приведенные в настоящей статье результаты — как расширение возможностей предложенных ранее механизмов генерации сейсмoeлектромагнитного шума или просто как приведение этих возможностей в естественные рамки, правильным ответом, очевидно, будет второй.

1. *Агранович В.М., Гинзбург В.Л.* Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов. — М.: Наука, 1979. — 432 с.
2. *Атауллаханов Ф.И., Лобанов Е.С., Морозова О.Л. и др.* Сложные режимы распространения возбуждения и самоорганизации в модели свертывания крови // *Успехи физ. наук.* — 2007. — **177**, № 1. — С. 87–104.
3. *Богданов Ю.А., Коболев В.П., Русаков О.М., Захаров И.Г.* Геополаритонное зондирование газоносных структур северо-западного шельфа Черного моря // *Геология и полез. ископаемые Мирового океана.* — 2007. — **22**, № 4. — С. 37–61.
4. *Богданов Ю.А., Павлович В.Н.* Неравновесное излучение земной коры — индикатор геодинамических процессов // *Геофиз. журн.* — 2008. — **30**, № 4. — С. 12–24.
5. *Богданов Ю.А., Павлович В.Н., Шуман В.Н.* Спонтанная электромагнитная эмиссия литосферы: состояние проблемы и математические модели // *Там же.* — 2009. — **31**, № 4. — С. 20–33.
6. *Богданов Ю.А., Бондаренко Н.В., Захаров И.Г. и др.* Аппаратурно-методическое обеспечение метода анализа спонтанной электромагнитной эмиссии Земли // *Там же.* — С. 34–43.
7. *Бредов М.М., Румянцев В.В., Топтыгин И.Н.* Классическая электродинамика: Учеб. пособие / Под ред. И.Н. Топтыгина. — М.: Наука, 1985. — 400 с.
8. *Ванштейн Л.А.* Распространение импульсов // *Успехи физ. наук.* — 1976. — **118**, вып. 2. — С. 339–367.
9. *Виноградов Е.А., Дорофеев И.А.* Термостимулированные электромагнитные поля твердых тел // *Там же.* — 2009. — **179**, № 5. — С. 449–485.
10. *Воробьев А.А.* О возможности электрических разрядов в недрах Земли // *Геология и геофизика.* — 1970. — № 2. — С. 3–13.
11. *Гинзбург В.Л., Цытович В.Н.* Переходное излучение и переходное рассеяние. — М.: Наука, 1984. — 360 с.
12. *Гольдин С.В.* Стихи и формулы: Учеб. пособие / Отв. ред. А.Э. Конторович, М.И. Эпов. — Новосибирск: Параллель, 2009. — 512 с.
13. *Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Аронов Б.Л.* О высокочастотном электромагнитном излучении при сейсмической активности // *Докл. АН СССР.* — 1979. — **248**, № 5. — С. 1077–1081.
14. *Гульельми А.В.* Проблемы физики геоэлектромагнитных волн (обзор) // *Физика Земли.* — 2006. — № 3. — С. 3–16.
15. *Гульельми А.В.* Ультранизкочастотные волны в коре и в магнитосфере Земли // *Успехи физ. наук.* — 2007. — **177**, № 12. — С. 1257–1276.
16. *Гуфельд И.Л.* Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. — Королев Моск. обл.: ЦНИИМаш, 2007. — 160 с.
17. *Давыдов В.А., Зыков В.С., Михайлов А.С.* Кинематика автоволновых структур в возбудимых средах // *Успехи физ. наук.* — 1991. — **161**, № 8. — С. 45–86.
18. *Дмитриевский А.Н., Володин И.А.* Автосолитонные механизмы дегазации Земли // *Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы. Материалы Всерос. конф. (г. Москва, 22–25 апр. 2008 г.).* — М.: ГЕОС. — 2008. — С. 152–154.
19. *Дубровский В.А., Сергеев В.Н.* Кратко- и среднесрочные предвестники землетрясений как проявление неустойчивости скольжения вдоль разломов // *Физика Земли.* — 2006. — № 10. — С. 11–18.
20. *Кинг Р., Смит Г.* Антенны в материальных средах. — В 2 кн. — М.: Мир, 1984. — 824 с.
21. *Левшенко В.Т.* Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы литосферного происхождения: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — М.: ОНФЗ РАН, 1995. — 36 с.
22. *Меньшиков Л.И.* Сверхизлучение и некоторые родственные явления // *Успехи физ. наук.* — 1999. — **169**, № 2. — С. 113–154.
23. *Никольский В.В.* Электродинамика и распространение радиоволн. — М.: Наука, 1978. — 544 с.
24. *Раутиан С.Г.* Об отражении и преломлении на границе среды с отрицательной групповой скоростью // *Успехи физ. наук.* — 2008. — **178**, № 10. — С. 1017–1024.
25. *Рыкунов Л.Н., Смирнов В.Б., Старовойт Ю.О.* Об иерархическом строении характера сейсмической эмиссии // *Докл. АН СССР.* — 1986. — **288**, № 1. — С. 81–85.
26. *Рытов С.М.* Введение в статистическую радиофизику. — М.: Наука, 1966. — 270 с.
27. *Садовский М.А.* Геофизика и физика взрыва. Избр. труды / Отв. ред. В.В. Адушкин — М.: Наука, 2004. — 440 с.
28. *Светов Б.С.* К теоретическому обоснованию сейсмoeлектрического метода геофизической разведки // *Геофизика.* — 2000. — № 1. — С. 28–39.
29. *Старостенко В.И., Лукин А.Е., Коболев В.П. и др.* Модель глубинного строения Донецкого складчатого сооружения и прилегающих структур по данным региональных геофизических наблюдений // *Геофиз. журн.* — 2009. — **31**, № 4. — С. 44–68.
30. *Сурков В.В.* Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. — М.: Моск. гос. инж.-физ. ин-т, 2000. — 235 с.
31. *Телепин М.А.* Диссипация в активной среде — вклад в тектоногенез и минерагению // *Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы. Материалы Всерос. конф. (г. Москва, 22–25 апр. 2008 г.).* — М.: ГЕОС, 2008. — С. 601–603.
32. *Уизем Дж.* Линейные и нелинейные волны. — М.: Мир, 1977. — 621 с.
33. *Цифра И.М., Шуман В.Н.* Параболические системы типа “реакция — диффузия” при моделировании процессов генерации и распространения электромагнит-

- ной эмиссии литосферы и методы их анализа // Геофиз. журн. — 2010. — 32, № 5.
34. Чеботарева И.Я., Кушнир А.Ф., Рожков М.В. Устранение интенсивной помехи при пассивном мониторинге месторождений углеводородов методом эмиссионной томографии // Физика Земли. — 2008. — № 12. — С. 65–82.
 35. Шуман В.Н. Электромагнитные сигналы литосферного происхождения в современных наземных и дистанционных зондирующих системах // Геофиз. журн. — 2007. — 29, № 2. — С. 3–16.
 36. Шуман В.Н. Уравнение генерации спонтанных электромагнитных сигналов в системе литосферных блоков // Там же. — 2008. — 30, № 1. — С. 42–48.
 37. Шуман В.Н., Богданов Ю.А. Импульсное электромагнитное излучение литосферы: спорные вопросы теории и полевой эксперимент // Там же. — 2008. — 30, № 2. — С. 32–41.
 38. Шуман В.Н., Богданов Ю.А. Электромагнитная эмиссия литосферы: пространственная структура и возможные механизмы генерации // Там же. — 2008. — 30, № 6. — С. 39–50.
 39. Gershenson N., Bambakidis G. Modeling of seismo-electromagnetic phenomena // Russ. J. of Earth Science. — 2001. — 3, № 4. — P. 247–275.

Поступила в редакцию 10.03.2010 г.

В.Н. Шуман

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ЭМИССИЯ ЛИТОСФЕРЫ: НОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ

Обсуждается проблема генерации и распространения электромагнитных сигналов литосферного происхождения. Внимание концентрируется на электродинамике геосреды — открытой диссипативной сейсмоэлектромагнитогенерирующей системы и методах ее описания, в частности, на взаимодействии излучения и вещества. Анализируются некоторые математические аспекты генерации электромагнитных возмущений радиоволнового диапазона. Рассматриваются возможности использования электромагнитной компоненты эмиссии литосферы с целью диагностики ее структуры и геодинамических процессов в ней. Приведены некоторые экспериментальные результаты по регистрации спонтанной электромагнитной эмиссии литосферы.

Ключевые слова: электромагнитные возмущения, механоэлектромагнитные трансформации, геосреда, сейсмоэлектромагнитогенерирующая структура, автоволновой механизм переноса.

В.М. Шуман

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ЕМІСІЯ ЛІТОСФЕРИ: НОВІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ І АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ

Обговорено проблему генерації та поширення електромагнітних сигналів літосферного походження. Увагу сконцентровано на електродинаміці геосередовища — відкритої дисипативної сейсмоелектромагнітогенеруючої системи та методах її опису, зокрема, на взаємодії випромінювання і речовини. Проаналізовано деякі математичні аспекти генерації електромагнітних збурень радіохвильового діапазону. Розглянуто можливості використання електромагнітної компоненти емісії літосфери з метою діагностики її структури та геодинамічних процесів у ній. Наведено деякі експериментальні результати щодо реєстрації спонтанної електромагнітної емісії літосфери.

Ключові слова: електромагнітні збурення, механоелектромагнітні трансформації, геосередовище, сейсмоелектромагнітогенеруюча структура, автохвильовий механізм перенесення.