

Высокочастотный спонтанный электромагнитный шум литосферы и томографические системы

© *В. Н. Шуман, 2014*

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 24 сентября 2013 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

Розглянуто питання, що стосуються проблеми побудови тривимірних зображень фізичних властивостей та структурних характеристик геосередовища методами трансмісійної, дифракційної та емісійної томографії, що використовують сейсмічні та електромагнітні хвилі. Увагу зосереджено на інформаційних можливостях методів, їх роздільній здатності й точності локалізації аномальних об'єктів. Наголошено на підходах, які ґрунтуються на ідеях і принципах нелінійної динаміки стосовно томографічних задач, можливостях адаптації та перенесенні уявлень сейсмічної томографії на електромагнітні системи, зокрема спонтанної електромагнітної емісії літосфери кілогерцового діапазону. Використано розширені уявлення про геосередовище, а також нові ідеї стосовно механізмів його генерації і поширення на основі автохвильового характеру процесів у геосередовищі. Зіставлено базові властивості хвильових та автохвильових процесів. Звернено увагу на спірні питання теорії, неуніверсальність класичних концепцій і підходів, зокрема, якщо використовуваний апарат домінує над адекватністю розгляду. Обговорено можливості та деякі результати експериментального обґрунтування методу.

Ключові слова: сейсмоакустичні та електромагнітні шуми, емісійна томографія, геосередовище, нелінійна динаміка, автохвилі.

High-frequency spontaneous electromagnetic noise of lithosphere and tomographic systems

© *V. N. Shuman, 2014*

The questions on the problem of restoration of three-dimensional images of physical properties and structural features of geo-medium applying the methods of transmission, diffraction and emission tomography that use seismic and electromagnetic waves, their informative abilities, resolvability and precision of objects localization have been examined in the paper. The approaches are accentuated, which are based on the ideas and principles of non-linear dynamics to solve tomographic problems, abilities to adapt and transfer the ideas of seismic tomography to electromagnetic systems, in particular, tomography of spontaneous electromagnetic emission of kilohertz range, which is generated in lithosphere of the Earth. Specific examination is conducted on the base of extended ideas on geo-medium as well as new versions of mechanisms of its generation and distribution based on auto-wave character of processes in geo-medium. Basic properties of wave and auto-wave processes are being compared. Controversial problems of theory are noticed, absence of universal character of classical concepts, in particular, in the case when appliance used weighs upon adequacy of consideration. Possibilities and some results of validation of experimental method are discussed.

Key words: seismic-acoustic and electromagnetic noises, emission tomography, geo-medium, non-linear dynamics, auto-waves.

“Когда информацию можно получить, посмотрев в Интернете, создается ее избыток, способный препятствовать приобретению знаний, и оно перестает внушать уважение”.

Г. Киссинджер

Введение. Как свидетельствует эксперимент, Земля, в частности ее литосфера, способна генерировать сейсмические и электромагнитные возмущения в широком диапазоне частот. Сейсмические явления, кроме крупномасштабных событий (сильная и средняя сейсмичность), включают слабую сейсмичность, а также непрерывный планетарный микросейсмический шум [Садовский, 2004; Гуфельд, 2007; Геншафт, 2009 и др.]. Поле микросейсмических колебаний (сейсмическое шумовое поле) характеризуется набором частот от сейсмоакустических (частоты более 1 кГц) до сейсмогравитационных колебаний планетарного масштаба (частоты менее 10^{-4} — 10^{-5} Гц) [Адушкин, Спивак, 2012]. Сейсмоакустические шумы охватывают диапазон частот от кГц до сотых долей Гц. По частотному составу они могут быть разделены на низкочастотные сейсмические (микросейсмические в диапазоне десятков Гц) и акустические (от десятков Гц до нескольких кГц).

Экспериментально установлено большое разнообразие электромагнитных возмущений, регистрируемых на земной поверхности или в приземной атмосфере в диапазоне частот от 10^{-4} до 10^6 Гц и выше и дана их классификация [Левшенко, 1995; Atmospheric ..., 1999; Сурков, 2000; Гульельми, 2007].

Существенно, что микросейсмическому и электромагнитному шуму в последние годы придается самостоятельное значение как с точки зрения изучения закономерностей их генерации и распространения, так и получения информации о свойствах геосреды, ее строении и развивающихся в ней динамических процессов [Николаев и др., 1986; Гуфельд, 2007; Геншафт, 2009; Чеботарева, 2011; Адушкин, Спивак, 2012; Шуман и др., 2012].

К настоящему времени стало понятно, что в широком смысле вопрос о природе сейсмоакустических и электромагнитных шумов литосферного происхождения является фундаментальным. Коснемся некоторых аспектов этой проблемы. Доминирует точка зрения, что геометрический шум (флуктуационно-диссипативный сейсмоакустический и спонтанный электромагнит-

ный) — продукт своеобразного механизма эволюции перколяции внедрения (динамики проницающей перколяции) [Гийон и др., 1991; Зосимов, Лямшев, 1995]. При этом активизация геометрического шума является основным фактором (следствием) пространственно-временной дегазации, контролирующей сеймотектонический процесс [Гуфельд и др., 2011; Гуфельд, 2007, 2013].

Заметим, что проявление свойств перколяционного типа весьма вероятно в породах с низкой проницаемостью или в трещиноватых средах, а образование фрактальных агрегатов в таких системах резко увеличивает мощность создаваемого в них излучения [Гийон и др., 1991; Зосимов, Лямшев, 1995].

Как известно, просачивание флюидов и газов из низов литосферы имеет диффузионную природу, и поэтому реализуются условия для возникновения фрактального геометрического шума как естественного физического явления, не требующего специальных условий возникновения. При этом определяющее значение имеет известная флуктуационно-диссипативная теорема статистической физики, связывающей спонтанные флуктуации системы с ее диссипативными свойствами. Именно за счет такого баланса флуктуации в системе никогда не исчезают, а поддерживаются на уровне, диктуемом ее дискретностью [Зосимов, Лямшев, 1995]. С этой точки зрения распространяющиеся в геосреде фронты градиентной скалярной перколяции позволяют дать физическое толкование наблюдаемых параметров сейсмоакустического шума как неравновесного самоорганизованного критического явления, ассоциируемый с этими фронтами диссипативный всплеск диэлектрической проницаемости при рассеянии на покоящихся или движущихся зарядах, содержащихся в геосреде или появляющихся в ней во время этого процесса, в свою очередь формирует широкодиапазонный фрактальный спектр электромагнитного излучения [Шуман, 2013].

Заметим, что с экспериментальной точки зрения фронты самоорганизованной критич-

ности являются наиболее энергетически активными источниками излучений, а с термодинамической — это неравновесные фазовые переходы в открытых системах [Зосимов, Лямшев, 1995]. Соответственно представляется безосновательным противопоставлять или разграничивать сейсмоакустическую и электромагнитную компоненты излучения. Разумеется, при этом роль начального возбуждения играет энергия низов литосферы (тепловой поток, обусловленный и диффузией легких газов — водород, гелий). Существенно, что энергия дегазации может быть переброшена вдоль шовных зон и глубинных разломов, быстро сконцентрирована и высвобождена со скоростью взрывной или даже детонирующей волны [Вол, Гилат, 2006].

Очевидно, в столь сложной ситуации идеи и принципы нелинейной динамики являются важным и эффективным направлением исследований таких систем. Случайность и хаос, возникающие в них и проявляющиеся в хаотической колебательной структуре временных вариаций геофизических полей, — неотъемлемое свойство системы. Эти представления в совокупности с моделью геосреды в виде иерархической самоподобно структурированной фрактальной системы блоков оказываются ключевыми для понимания и истолкования вариаций геофизических полей, наблюдаемых в эксперименте [Лукк и др., 1996]. При этом фрактальные модели качественно меняют подходы к описанию этих явлений и дают, быть может, самое естественное их описание. Тем не менее вопрос о механизмах их генерации и распространения нельзя считать исчерпанным [Левшенко, 1995; Гульельми, 2007; Шуман, 2013].

Как известно, общей теории описания диссипативных структур, возникающих в активных средах, не существует, и каждый достаточно глубоко исследованный случай такого рассмотрения дает примеры новых типов их динамики и самоорганизации, причем нет оснований думать, что эти рассмотренные примеры уникальны. Представляется также, что нет и всеобъемлющих моделей реальной геосреды, описываемых конечной системой дифференциальных уравнений.

Возможно, эти трудности в значительной степени усугубляются невозможностью переноса данных лабораторного моделирования процессов генерации на условия земной коры: на натурном и лабораторном масштабе они оказались существенно разными [Гуфельд, 2007, 2011].

Заметим, что классические представления о генерации спонтанного сейсмоакустическо-

го электромагнитного шума существенно опираются на модели сплошной среды и используют математический аппарат, оперирующий, главным образом, гладкими функциями пространства и времени (уравнение генерации Гульельми — Левшенко, оптимизационная модель Гершензона — Бамбакидиса и др.). Однако представления о геосреде как открытой системе с множеством самоорганизующихся структур в значительной степени лишает нас такой возможности. Очевидно, механика и электродинамика такой самоорганизующейся блочно-иерархической структуры оказывается совершенно другой. Тем не менее, несмотря на некоторую неопределенность в трактовке геометрического шума литосферы, при диагностике ее структуры и динамики оказывается эффективным путь изучения сигналов, генерируемых этой системой, или изучения ее отклика на внешнее воздействие.

В частности, разработаны эффективные методы восстановления трехмерных изображений физических свойств и структурных особенностей геосреды методами трансмиссионной, дифракционной и эмиссионной томографии, использующими сейсмические, сейсмоакустические и, частично, электромагнитные волны, опираясь на расширенные представления о ее модели и свойства. Развита и опробована методика эмиссионной сейсмической томографии, использующие информативность пространственно-когерентной составляющей шумового сейсмического поля [Николаев и др., 1997; Николаев, 2002; Чеботарева, 2010, 2011].

Тем не менее, в отличие от сейсмики, эти идеи и подходы не получили должного отражения и развития в геоэлектрике и все еще относятся к разряду экзотических, сфера применений которых и результаты весьма ограничены. Очевидно, здесь можно упомянуть лишь о методе томографии межскважинного пространства и некоторых модификациях георадарных зондирующих систем, относящихся к методам с контролируемым возбуждением поля. Выяснить причины такого положения дел, привлечь к проблеме внимание геофизиков, обозначить возможные пути ее решения с точки зрения адаптации классических подходов и неклассических приемов и является основной задачей данной публикации. При этом внимание будет концентрироваться на особенностях подходов, методах нелинейной диагностики структуры и динамики геосреды в шумовых спонтанных электромагнитных полях литосферного происхождения килогерцового диапазона, использование

которых в этом аспекте еще сравнительно недавно казалось ограниченным и малоперспективным.

О концептуальных основах сейсмотомографии. Как известно, существуют два основных типа сейсмотомографии — лучевая и дифракционная [Николаев и др., 1997; Николаев, 2002]. Применение той или иной ее модификации зависит от информации об исследуемом объекте. Если его размеры значительно превышают длину волны зондирующего сигнала, используют лучевую томографию. Когда же характерные размеры неоднородностей сравнимы или меньше длины волны — дифракционную. Одно из преимуществ дифракционной томографии перед лучевой состоит в более полном использовании информации. Кроме того, нет необходимости выделения времен (моментов) прихода отдельных волн, так как запись колебаний обрабатывается целиком. Однако из-за трудностей в практическом использовании соответствующих процедур методы дифракционной томографии менее известны и менее используются.

Лучевая сейсмическая томография основывается на определении скоростей распространения объемных и поверхностных волн и относится к методам направленного приема. Сфера ее применения — от глобальных региональных сейсмических экспериментов до локальных, в частности инженерно-геофизических исследований.

Очевидно, не будет преувеличением утверждать, что основу сейсмотомографии составляют лучевые методы и их обобщения. Можно отметить, что ее современные методы и модификации достаточно хорошо описывают те условия, при которых аппарат геометрической оптики оказывается адекватным физическим условиям эксперимента.

Как известно, метод геометрической оптики эффективен при нахождении волновых полей в условиях плавно-неоднородных и медленно-нестационарных сред. Он существенно опирается на лучи, выполняющие роль каркаса, несущего волновое поле [Кравцов, Орлов, 1980].

Кратко напомним вывод основных уравнений для лучей на примере распространения скалярной монохроматической волны с частотой ω $u(\mathbf{R}, t) = u(\mathbf{R}) \exp(-i\omega t)$ в среде с неоднородным в пространстве распределением фазовой скорости $V(\mathbf{R})$, где $\mathbf{R} = (\mathbf{r}, z)$, $\mathbf{r} = (x, y)$ [Абдуллаев, Заславский, 1991]. Как известно, если характерный масштаб L изменения ско-

рости волны $V(\mathbf{r}, z)$ значительно превосходит длину волны, т. е. $\lambda/L \ll 1$, то поле распространяющейся волны можно представить в виде

$$u(\mathbf{R}) = A(\mathbf{R}) e^{iks(\mathbf{R})} \quad (1)$$

с медленно изменяющимися в пространстве амплитудой $A(\mathbf{r}, z)$ и фазовой функцией $S(\mathbf{r}, z)$, удовлетворяющих уравнениям

$$(\nabla S)^2 = n^2(\mathbf{r}, z), \quad \mathbf{n}(\mathbf{r}, z) = \frac{V_0}{V(\mathbf{r}, z)},$$

$$\nabla(A^2 \nabla S) = 0, \quad (2)$$

где $n(\mathbf{r}, z)$ — показатель преломления среды; $V(\mathbf{r}, t)$ — фазовая скорость; $k = 2\pi/\lambda$ и V_0 — соответственно волновое число и скорость волны в однородной среде.

Первое уравнение в системе (2) — уравнение эйконала — нелинейное дифференциальное уравнение первого порядка. Оно обычно решается методом характеристических уравнений, вид которых можно записать в представлении Гамильтона. Вводя обобщенный импульс $\mathbf{p} = \nabla S$, уравнение эйконала (2) может быть представлено в виде

$$H = H(\mathbf{R}, \mathbf{p}) = 0. \quad (3)$$

При этом вид функции $H(\mathbf{R}, \mathbf{p})$ определяется уравнением эйконала и зависит от выбранной независимой переменной τ , функциями которой являются характеристические кривые $\mathbf{R} = \mathbf{R}(\tau)$ и $\mathbf{p} = \mathbf{p}(\tau)$. Вспомогательная переменная τ определяет уравнения луча в параметрической форме, которые, в свою очередь, находятся с помощью канонических уравнений Гамильтона:

$$\frac{d\mathbf{R}}{d\tau} = \frac{dH}{d\mathbf{p}}, \quad \frac{d\mathbf{p}}{d\tau} = -\frac{dH}{d\mathbf{R}}, \quad \frac{dS}{d\tau} = \frac{\mathbf{p}dS}{d\mathbf{p}} \quad (4)$$

с функцией Гамильтона (3).

Проекцию характеристических кривых $\mathbf{R} = (\mathbf{r}, z)$, $\mathbf{p}(\tau)$ на трехмерное конфигурационное пространство называют лучом.

Однако границы применимости лучевого подхода в трехмерных задачах все еще недостаточно ясны или, быть может, недостаточно известны, несмотря на чрезвычайно широкое его использование в геометрической акустике или геометрической сейсмике.

В работе [Кравцов, Орлов, 1980] предпринята попытка ликвидации этого пробела на эвристической основе. В ней, опираясь на гюйгеново-френелевскую картину формирования волнового поля, сформированы универсальные достаточные условия применимости метода геометрической оптики.

Напомним, что в соответствии с принципом Гюйгенса — Френеля формирование волнового поля в точке наблюдения происходит в результате интерференции вторичных волн, которые порождаются первичной волной в каждой точке фазового фронта. Определяющее значение имеет здесь первая зона Френеля, поскольку эти вторичные волны от первой зоны Френеля различаются между собой по фазе не более чем на π и поэтому не гасят друг друга.

Объем, ограниченный огибающей первых зон Френеля, называют френелевским. Он выделяет ту часть пространства, которую естественно считать областью локализации луча, рассматриваемого в качестве физического объекта. Иначе говоря, френелевский объем определяет область пространства, которая формирует волновое поле в рассматриваемой точке и составляет физическое содержание термина "луч" [Кравцов, Орлов, 1980]. Таким образом, в отличие от математического луча, физический луч имеет конечную толщину при конечных значениях длины волны λ . На этой основе формируются следующие эвристические критерии применимости геометрической оптики [Кравцов, Орлов, 1980]:

Критерий 1. Параметры среды, а также параметры волны (амплитуда и градиент фазы) не должны заметно изменяться в поперечном сечении френелевского объема (что предполагает выполнение некоторых неравенств).

Критерий 2. Разность фаз, соответствующая лучам, приходящих в одну и ту же точку, не должна быть меньше π (соответственно разность хода не должна быть меньше $\lambda/2$).

Иначе говоря, луч не должен проходить заметную долю своего пути во френелевских объемах других лучей, приходящих в ту же точку.

Следует подчеркнуть универсальность и достаточность этих критериев, в том числе и в неоднородных средах. Существенно, что дифракционные по своему содержанию ограничения (критерии 1 и 2) выражены на лучевом языке, в результате чего, по мнению Ю. Кравцова и Ю. Орлова, геометрическая оптика приобретает внутренние критерии применимости.

Аналогично могут быть рассмотрены условия применимости пространственно-времен-

ной геометрической оптики, опираясь на пространственно-временной френелевский объем. Кроме того, сформированные критерии могут быть обобщены на векторные поля, наложив ограничения на малость изменения поляризации волны в поперечном сечении френелевского объема. Наглядность, универсальность, эффективность геометрической оптики для решения широкого спектра задач, в том числе сейсмических, — главные достоинства этой модели. С ней ассоциируется простая гидромагнитная модель распространения энергии, которая характеризуется вещественной скалярной функцией, являющейся решением уравнения эйконала.

Итак, классическая геометрическая оптика не может учесть дифракционных эффектов, так как обмена энергией между лучевыми трубками нет, поэтому за каким-либо препятствием образуется резко очерченная тень. Однако позже было показано, что геометрооптический подход может быть использован и за акустикой. Последнее обстоятельство связано с тем, что все соотношения геометрической оптики имеют смысл и в том случае, когда эйконал, амплитуда, координаты лучей и каустик становятся комплексными [Марков, Васильев, 1970; Тимофеев, 2005]. Но при этом проявляются качественные отличия "комплексной" геометрической оптики от обычной. В частности, комплексные лучи не удовлетворяют принципу Ферма, который утверждает, что лучу соответствует кривая, на которой эйконал экстремален.

Заметим, что в диэлектрической среде с потерями диэлектрическая проницаемость является комплексной величиной. Следовательно, эйконал будет комплексным и в освещенной области. Возникают и другие проблемы. Прежде всего, само понятие скорости распространения электромагнитных возмущений в реальной поглощающей среде является приближенным. Возникает вопрос: что такое сигнал (переносчик информации) и какова его скорость? Импульс с голоморфной (аналитической) огибающей $F(0, t)$ не является сигналом в собственном смысле этого слова, поскольку такой импульс бесконечен во времени и лишен элемента внезапности (фронта). Что же касается скорости распространения его максимума, то это скорость внутреннего движения в импульсе, причем более или менее кратковременная. Передача информации с фазовой скоростью также невозможна по той же причине [Ванштейн, 1976]. Становится необходимым в общем случае введение понятий фазовой и груп-

повой скорости, скорости распространения сигнала, энергии и фронта импульса (см. конкретизацию этих представлений применительно к геоэлектромагнитным приложениям в работе [Шуман, Савин, 2011]).

Другой подход к обобщению метода геометрической оптики на среды с поглощением, в известном смысле уточняющий и дополняющий предыдущий, предложен в работе [Худак, 1985], в которой получено описание класса всех решений системы уравнений Максвелла:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = i\omega\mu\mathbf{H}, \quad \operatorname{rot} \mathbf{H} = -i\omega\tilde{\epsilon}\mathbf{E},$$

удовлетворяющих условию ортогональности

$$\mathbf{E} \cdot \mathbf{H} = 0, \quad (6)$$

где \mathbf{E} и \mathbf{H} — комплексные амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей; $\mathbf{E} \cdot \mathbf{H}$ — скалярное симметричное произведение комплексных векторов; μ — магнитная проницаемость среды; $\tilde{\epsilon} = (\epsilon + i\sigma/\omega)$ — ее комплексная диэлектрическая проницаемость; σ — удельная проводимость; ω — круговая частота.

Показано, что условие ортогональности $\mathbf{E} \cdot \mathbf{H} = 0$ необходимо и достаточно для существования таких комплекснозначных функций φ_1 и φ_2 , x_1, x_2 точки $M(x, y, z)$ и частоты ω , для которых всякое решение системы уравнений Максвелла, удовлетворяющее (6), имеет вид

$$\mathbf{E} = \operatorname{grad} x_1 e^{i\omega\varphi_1}, \quad \mathbf{H} = \operatorname{grad} x_2 e^{i\omega\varphi_2}. \quad (7)$$

При этом фазовые функции φ_1 и φ_2 определяют структуру электромагнитного поля в том смысле, что если их считать заданными и гладкими функциями точки $M(x, y, z)$, система уравнений (5) становится эквивалентной системе линейных алгебраических уравнений относительно векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} :

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_1 \times \mathbf{E} &= \mu\mathbf{H}, \quad \mathbf{k}_2 \times \mathbf{H} = -\tilde{\epsilon}\mathbf{E}, \\ \mathbf{k}_1 &= \operatorname{grad} \varphi_1, \quad \mathbf{k}_2 = \operatorname{grad} \varphi_2, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\mathbf{k}_1 \times \mathbf{E}$ и $\mathbf{k}_2 \times \mathbf{H}$ — векторные произведения комплексных векторов.

Далее, для того, чтобы комплексные функции φ_1 и φ_2 были фазовыми для решений (7) при условии (6), необходимо, чтобы они удовлетворяли обобщенному уравнению эйконала:

$$\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{k}_2 = \mu\tilde{\epsilon} = \mu(\epsilon + i\sigma/\omega). \quad (9)$$

Таким образом, в поглощающей среде, за исключением некоторых вырожденных случаев

с определенной симметрией (плоская и сферическая волна), все лучи становятся комплексными. При $\mathbf{k}_1 = \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_1$, где \mathbf{k} — вещественный волновой вектор, условие эйконала (5) превращается в классическое:

$$|\operatorname{grad} \varphi|^2 = \epsilon\mu. \quad (10)$$

В итоге решение задачи об изменении интенсивности и формы электромагнитных импульсов в среде с поглощением оказывается исключительно сложным. Иногда даже утверждается о принципиальной невозможности строгого ее решения, если учесть возможность частотной дисперсии параметров геосреды [Калинин и др., 2001].

Предыдущие выкладки касались в основном гармонического режима. Существует, однако, независимая теория аперидических электромагнитных возмущений, основанная на теории линейных дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа, к классу которых относится и система уравнений Максвелла. Эта теория особенно эффективна в случае возмущений с явно выраженным фронтом. Установлено [Борн, Вольф, 1970], что фронты электромагнитных импульсов представляют собой волновые фронты с позиций геометрической оптики: они распространяются, отражаются, преломляются и дифрагируют в соответствии с принципом Ферма. Обычные лучи геометрической оптики оказываются частным случаем пространственно-временных лучей. Фронты импульсных возмущений этого типа, рассматриваемые как гиперповерхности в системе пространство—время, являются характеристиками уравнения эйконала.

Заметим, что теория гиперболических уравнений с присущим ей исследованием характеристик хорошо разработана и известна [Курант, 1964]. Простейший математический объект, с помощью которого можно описать взаимодействие среды и поля, — разрыв. Очевидно, разрывное описание волновых явлений существенно упрощает их понимание и интерпретацию [Гольдин, 1988].

Коснемся теории вопросов, связанных с эмиссионной сейсмической томографией. Как известно [Чеботарева, 2010, 2011], метод эмиссионной сейсмотомографии относится к классу методов направленного сейсмического приема. Его физической основой является тот факт, что в геосреде существуют области слабого шумоподобного сейсмоакустического излучения, активизирующиеся при низкочастотных дефор-

мационных природных и техногенных воздействий. Эксперимент демонстрирует достаточно стабильную во времени картину пространственного распределения энергии сейсмоакустических шумов и подтверждает реальность задачи локализации их источников в исследуемом объеме геосреды. При этом в качестве источников эмиссии могут выступать не только активные, акустосейсмошумящие области или зоны, но и любые достаточно контрастные скоростные неоднородности, которые проявляются как яркие переизлучатели волновых процессов в геосреде.

Обычно рассматриваются несколько типов задач, решение которых основывается на применении принципов эмиссионной томографии:

- связанные с построением трехмерных моделей сейсмически шумящих объектов и контрастных неоднородностей;
- методы мониторинга сейсмических событий разного масштаба — метод 3D сейсморазведки (метод дифракционной томографии с управляемым внешним облучением).

Обработка данных обычно основана на суммировании сейсмических трасс вдоль годографов, рассчитанных для применяемой системы наблюдений в предположении известной скоростной модели разреза [Хогоев, Колесников, 2011].

С учетом двойственности природы микросейсмического поля, когда, с одной стороны, оно представлено интерференцией сейсмических волн различных типов, механизмы распространения которых известны, а с другой — интерпретируется в отдельно выбранной точке регистрации в качестве случайного процесса, развиты два основных подхода к его интерпретации. Один из них основывается на детерминированных свойствах микросейсмических волн, а другой (статистический) базируется на корреляции некоторых устойчивых статистических характеристик случайного микросейсмического поля с разномасштабными неоднородностями в исследуемом объеме геосреды [Горбатилов и др., 2008; Горбатилов, Степанова, 2008].

В последние годы на основе концепции геосреды как открытой нелинейной динамической системы предложены новые методы локализации объектов в ней по критерию степени упорядоченности акустосейсмических колебаний относительно фона, предложенному Ю.М. Климонтовичем в рамках теории открытых систем [Чеботарева, 2010, 2011]. Развиты и получили экспериментальную апробацию методы, использующие информативность простран-

венно-когерентной компоненты шумового сейсмического поля.

Число публикаций, посвященных этим вопросам, быстро растет, и было бы нереальным здесь ставить задачу о ретроспективном анализе и критическом обзоре развития томографических моделей и полученных результатов. Наша задача весьма частного и ограниченного характера — анализ возможностей использования метода применительно к электромагнитным зондирующим системам на основе спонтанного электромагнитного шума литосферного происхождения.

О точности локализации эмиссионных источников. Как свидетельствует эксперимент, геосреда (литосфера) достаточно "прозрачна" для распространяющихся в ней сейсмических волн, чтобы, с одной стороны, сохранить их пространственную когерентность и необходимую амплитуду, а с другой стороны, пространственное распределение источников излучения является достаточно неравномерным. Разумеется, при распространении сейсмической волны в области со сложным строением и гетерогенной структурой происходит существенное искажение амплитуд и фаз регистрируемых сигналов вдоль волнового фронта, величина которого возрастает по мере увеличения длины луча и частоты колебаний. Однако, несмотря на обилие математических методов и алгоритмов в задачах вычислительной томографии, все еще мало известны или отсутствуют четкие представления о границах областей применимости лучевой томографии. Трудности их определения, возможно, связаны с тем, что точность локализации объектов зависит от многих факторов: кривизны фронта волны в среде, плотности пунктов регистрации, диаграммы направленности излучателя, спектров излучателя, других параметров.

Физический предел разрешимости метода лучевой томографии, как известно, сопоставим с размером первой зоны Френеля. В геометрическом приближении, типичном при рассмотрении этого вопроса, согласно классическому критерию Рэлея, пространственное разрешение определяется размером пятна в изображении точечного источника, на краю которого яркость (интенсивность) уменьшается на 60%. Радиус этого пятна и выбирается в качестве оценки точности определения горизонтальных координат источника. Грубую оценку точности локализации можно получить также из оценки диаметра сечения сейсмического луча, определяемого на основе принципа Гюйгенса — Фре-

нея. В соответствии с этим принципом при заданной длине волны λ физический сейсмический луч ассоциируется с эллипсоидом с фокусами в конце луча длины L , оптимального в смысле принципа Ферма, с максимальным диаметром нормального сечения [Сейсмическая ..., 1990]:

$$l_{\max} = \sqrt{\lambda L / 2}.$$

Однако ввиду того, что длина L всех лучей внутри эллипсоидального объема различается не более чем на $\lambda/4$, то соответственно диаметр нормального сечения на концах оптимального луча будет $l_0 \approx \lambda/2$. Обычно эту величину и выбирают в качестве оценки точности определения горизонтальной координаты глубинного источника и величины шага расстановки приемников вдоль профиля наблюдений. Размер такого "пятна" для лучей в диапазоне $0 \leq L \leq 2D$ имеет, согласно оценкам [Чеботарева, 2011], продольный l_{11} и поперечный l_1 размеры:

$$\lambda \leq l_{11} \leq 2\lambda, \quad 0,4\lambda \leq l_1 \leq 32\lambda,$$

где D — апертура приемной группы, L — расстояние от центра группы до источника.

Разумеется, многочисленные преломленные и отражающие границы в неоднородной литосфере, возникающие вторичные волны неопределенной поляризации деформируют и изменяют направление волнового фронта. По этой причине вместо азимута на источник от прямых волн фактически определяется некоторый эффективный, кажущийся азимут, указывающий, возможно, на отражающие границы. Одновременное функционирование нескольких источников делает определение правильного азимута еще более сложным.

Очевидно, в рассматриваемом контексте при решении геотомографических задач можно надеяться на использование новых возможностей, вытекающих из неклассического описания геосреды. В частности, к их числу могут быть отнесены задачи реконструкции объемного распределения ее нелинейных и стохастических параметров, устойчивых статистических характеристик случайного микросейсмического поля. Экспериментально установлено [Горбатилов и др., 2008; Горбатилов, Степанова, 2008], что горизонтальное разрешение в этом случае может достигать величины 0,04 (!) от длины зондирующей волны.

Сосредоточим далее внимание на электромагнитной стороне проблемы. Сильное затухание электромагнитных возмущений, распрост-

раняющихся в литосфере (до 10^2 — 10^3 дБ/км) на частотах 10^4 — 10^6 Гц [Гохберг и др., 1985] принципиально меняет существо дела. В рассматриваемом частотном диапазоне спектра эмиссионных излучений мы находимся в диффузионной области, где, как уже упоминалось, обычные лучевые представления не работают. Даже при весьма умеренном с точки зрения геоэлектрических приложений поглощению лучевая кинематика должна быть дополнена комплексными лучами. В этом случае разрешающая способность низкочастотных электромагнитных полей существенно ограничена их гладким пространственным поведением. Достаточно грубая оценка возможности выделения аномального объекта состоит в следующем: разрешимая аномалия должна иметь размеры, сравнимые с расстоянием от нее до пункта наблюдений [Некут, Слис, 1989]. Заметим, что на относительно низких частотах (менее 100 кГц) удельная электропроводность большинства горных пород является действительной и частотно-независимой величиной. На высоких частотах (более 1 МГц) мнимая компонента проводимости может оказаться достаточно большой и тогда возможно волновое, а не диффузионное распространение. Однако высокая скорость их затухания в проводящих средах сильно ограничивает область их геофизических приложений (межскважинное радиопросвечивание, радиолокационные методы). В итоге оказываются реализуемыми, с точки зрения томографического подхода, два возможных диапазона изменений. Во-первых, это СНЧ (ULF) возмущения с характерными частотами от мГц до Гц, источники которых могут находиться в земной коре на значительных глубинах, и, во-вторых, ОНЧ (VLF) диапазон с частотами от сотен Гц до первых МГц, источники которых находятся в поверхностных или близповерхностных ее слоях.

Как известно, помимо лучевого подхода и лучевой кинематики, дополненных волновым подходом и волновой кинематикой, возможен и третий, ориентированный на анализ распространения электромагнитных импульсов в поглощающих средах, который естественно называть энергетическим [Ванштейн, 1976]. Однако он может быть реализован только в том случае и тех условиях, при которых можно воспользоваться выражением для плотности энергии в рассматриваемой среде. Тогда оказывается возможным введение понятия энергетической скорости распространяющихся в ней электромагнитных импульсов [Гинзбург, 1967; Ванштейн, 1976]. Естественность этого утвер-

ждения почти очевидна, поскольку само понятие скорости распространения электромагнитного возмущения в поглощаемой среде по своему смыслу является приближенным. Применительно к этим условиям Л. А. Ванштейном предложено определение времени прихода электромагнитного импульса в точку наблюдений по "центрам" импульсного потока энергии t_0 и центрам энергетических потерь t_1 [Ванштейн, 1976].

Задача формулируется им следующим образом: при некотором $r > 0$ наблюдается электромагнитный импульс, посланный из точки $r = 0$. Этот импульс приносит с собой поток энергии F_r и выделяет в окрестности точки r мощность, пропорциональную P и имеющую импульсный характер. Вводя обозначения

$$t_0 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} t F_r dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} F_r dt},$$

$$t_1 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} t P dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} P dt},$$

где t_0 — момент прихода центра импульсного потока энергии, t_1 — мощность потерь, и принимая во внимание соотношение, связывающее плотность энергии W , плотность потока энергии F_r и плотность мощности потерь

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial F_r}{\partial r} + P = 0,$$

находим

$$\frac{\partial t_0}{\partial r} = \frac{1 + \gamma(t_0 - t_1)}{V_e},$$

где

$$V_e = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} F_r dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} W dt},$$

$$\gamma = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} P dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} W dt}.$$

Существенно, что при условии достаточно медленной модуляции по амплитуде V_e совпадает с определенной ранее Бриллюэном скоро-

стью переноса энергии на несущей частоте:

$$V_e = \frac{F_r}{W},$$

а γ равно отношению P/W при $\omega = \omega_0$. При отсутствии затухания, вызванного потерями, V_e совпадает с групповой скоростью V_g [Ванштейн, 1976].

Очевидно, приведенные равенства имеют значения эффективных кинематических характеристик электромагнитного процесса, интегрально отражающих влияние среды на пространственно-временную деформацию импульсов.

Напомним, что понятие групповой скорости четко определено только для волнового пакета, состоящего из элементарных монохроматических волн вида $E_0 \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)]$ внутри достаточно узкой области спектра, т. е. только для специфической волновой формы (волнового пакета) и, вообще говоря, является приближенным, справедливым лишь в асимптотическом смысле.

В частности, в диссипативной среде удается ввести групповую скорость (вещественный вектор) как среднюю скорость перемещения области локализации финитных возмущений:

$$\langle \mathbf{V}_{\text{гр}} \rangle = \frac{\partial \text{Re}(\omega)}{\partial \mathbf{k}},$$

а также скорость их расплывания (деформации)

$$\mathbf{V}_{\text{распл}} = \frac{\partial \text{Im}(\omega)}{\partial \mathbf{k}}.$$

(В случае расплывания электромагнитных импульсов в диссипативных средах спектры частот $\omega(\mathbf{k})$, а следовательно, и $\mathbf{V}_{\text{гр}}$ являются комплексными. При этом в общем случае скорость $\mathbf{V}_{\text{гр}}$ не имеет энергетического смысла [Ванштейн, 1976; Кузелев, Рухадзе, 1979].)

Возможности "энергетического" подхода в теории электромагнитных зондирующих систем с контролируемыми источниками поля, работающими в импульсном режиме, уже анализировались в ряде работ (см., например, [Гроза, 1985; Шуман, Савин, 2011]). Что же касается применения метода к пассивным источникам, в частности шумовой компоненте электромагнитной эмиссии, то его перспективы не вполне понятны и до настоящего времени не обсуждались.

Таким образом, если говорить о возможностях переноса представлений и методов эмис-

сионной сейсмической томографии (с относительно слабым реформированием теории), то она в принципе существует, если работать в СНЧ или ОНЧ частотных диапазонах. Однако сильная неоднородная гетерогенная структура приповерхностных слоев земной коры приводит к сильному искажению амплитуд и фаз, регистрируемых на дневной поверхности сигналов вдоль распространяющихся фронтов, причем величина этих искажений возрастает с увеличением длины трассы распространения волны и росте частоты колебаний. Очевидно, весьма проблематично продвинуться на этом пути, не внося дополнительного понимания в происходящие в геосреде процессы и природу явлений, в частности электромагнитных. Возвратимся к этому вопросу несколько позже, а сейчас обратимся к другой, менее известной стороне проблемы, обычно остающейся, так сказать, "за кадром", а именно информационных возможностях шумовых полей с целью диагностики геосреды и происходящих в ней процессов.

Об информационных возможностях эмиссионного эксперимента. Предположим, что источник спонтанной электромагнитной эмиссии (шумового поля) представляет собой набор независимых излучателей, генерирующих волны со случайной амплитудой, фазой и поляризацией, причем каждый элементарный излучатель (или объем) генерирует немонахроматические волны. Очевидно, результирующее поле, регистрируемое на поверхности геосреды сложным случайным образом, будет изменяться в пространстве и времени. Можно предположить, что в итоге все условия центральной предельной теоремы теории вероятностей будут выполнены. Тогда эти случайные электромагнитные поля будут принадлежать к классу нормальных, у которых все n -мерные распределения вероятностей являются гауссовыми.

Теоретические методы расчета свойств флуктуационных электромагнитных полей сводятся к решению задач математической физики на основе уравнений Максвелла в выбранной геометрии с заданными граничными условиями и применению флуктуационно-диссипативной теоремы [Виноградов, Дорофеев, 2009]. Тогда к описанию статистических характеристик флуктуационных полей оказывается применимой корреляционная теорема случайных процессов. Соответствующая теория электромагнитных флуктуаций была развита в середине прошлого века С. М. Рытовым [Рытов, 1966]. Соответствующие корреляционные функции

удобно представить в симметризованном виде, в частности, для компонент магнитной индукции:

$$\begin{aligned} \gamma_{ij}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; t - t') &= \\ &= \frac{1}{2} \left\langle B_i(\mathbf{r}, t) B_j(\mathbf{r}, t') + B_j(\mathbf{r}', t') B_i(\mathbf{r}, t) \right\rangle, \end{aligned}$$

где угловые скобки означают усреднение по ансамблю. Обычно используют разложение Фурье. Тогда фурье-образ корреляционной функции, согласно теореме Винера — Хинчина, представляет собой спектральную плотность флуктуаций:

$$\gamma_{ij}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \gamma_{ij}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \tau) e^{i\omega\tau} d\tau,$$

где интеграл понимается в смысле сходимости по вероятности или в среднем квадратичном [Виноградов, Дорофеев, 2009].

Согласно корреляционной теореме, для определения корреляционных функций компонент полей должны быть известны корреляционные функции токов в системе или функции Грина, которые задаются флуктуационно-диссипативной теоремой. Как известно, эта теорема связывает спонтанные флуктуации параметров системы с ее диссипативными свойствами. В частности, она связывает спектральную плотность флуктуаций сторонних токов (которые, вообще говоря, могут быть обусловлены и неэлектромагнитными процессами) с антиэрмитовой частью тензора диэлектрической проницаемости среды [Ильинский, Келдыш, 1989]:

$$\varepsilon_{ij}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) = \varepsilon'_{ij}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) + i\varepsilon''_{ij}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega).$$

Важный вывод, следующий из теории С.М. Рытова, — в произвольной неоднородной среде корреляционная функция электромагнитных флуктуаций, создаваемых дельта-коррелированными источниками и измеренных в двух пространственно-разнесенных точках, пропорциональна функции Грина, которая описывает процесс распространения волн (флуктуаций) между этими точками. В частном случае выполнения измерений вне среды в вакууме (воздухе) корреляционные функции удовлетворяют обычному волновому уравнению в вакууме, а их фурье-образы — уравнению Гельмгольца [Виноградов, Дорофеев, 2009].

Следовательно, статистическая информация о флуктуационных полях не теряется, поскольку

ку достаточно анализировать динамику корреляционных функций. Связь корреляционных функций и функций Грина для конкретной краевой задачи означает, что эти функции в принципе содержат идентичную информацию о среде, которая, к примеру, может быть получена при размещении источника и приемника поля в точках \mathbf{r} , \mathbf{r}' . Это открывает дополнительные возможности исследования геосреды, работая в тех частотных диапазонах или с такими типами волн, для которых отсутствуют доступные естественные или контролируемые источники.

Как известно, для больших скоплений рассеивателей, образующих так называемые "мутные" среды, существенно многократное рассеивание. В этом случае нашли применение следующие методы исследований: метод геометрической оптики, правильно описывающий лишь относительно слабые флуктуации амплитуды на ограниченных разносах (расстояниях); метод главных возмущений, учитывающий дифракционные эффекты, но лишь в области слабых флуктуаций; приближение параболического уравнения вместе с приближением марковского процесса, которое позволяет получить уравнения для произвольных моментов и описать поведение функции когерентности на произвольных расстояниях.

Заметим, что сейсмический эксперимент продемонстрировал стабильную во времени картину пространственного распределения энергии сейсмических шумов и возможность локализации их источников в исследуемом объеме геосреды [Чеботарева, 2011].

Томография спонтанной электромагнитной эмиссии. Как уже отмечалось, двойственность микросейсмического поля стала причиной разделения и разработки двух групп технологий диагностики геосреды: детерминированных, основанных на детерминированных его свойствах, и статистических, базирующихся на статистических параметрах. Эти методы и подходы не являются исчерпывающим решением проблемы, так как адекватное описание хаотических полей и процессов является весьма непростой, трудно разрешимой задачей. Так, до недавнего времени непериодичность в зависимости от времени и координат состояния, сплошной спектр мощности и спадающая во времени автокорреляционная функция однозначно связывались с представлениями о случайном процессе. Однако, как оказалось, подобными свойствами может обладать и процесс, порождаемый детерминированными законами: режимы функционирования детерминирован-

ных нелинейных систем со странными аттракторами обладают специфическими свойствами, совокупность которых включается в понятие детерминированного хаоса [Анищенко, 1997].

Далее, геосреда — хороший пример активной нелинейной неравновесной системы с множеством самоорганизующихся структур [Лукк и др., 1996; Гуфельд, 2007; Геншафт, 2009]. Аккумуляция и передача больших порций энергии из низов литосферы сопровождается генерацией взаимодействующих сейсмоакустических, электромагнитных гидродинамических и тепловых возмущений, распространяющихся в ней. При этом диссипативные структуры, самоорганизующиеся в открытых системах, являются фрактальными [Зосимов, Лямшев, 1995]. Весьма вероятно, что и сейсмоакустический (геометрический) шум, и спонтанное электромагнитное излучение могут быть истолкованы в терминах автоколебаний — особого типа возмущений (волн), которые могут существовать в активных средах (автоволн), а понимание самоорганизации как перехода от хаотического к более упорядоченному состоянию — основа образования диссипативных структур (временных, пространственных и пространственно-временных) [Климонтович, 1999]. Существенно, что диссипация в этом случае играет конструктивную роль. Как известно, существует два типа сред, в которых происходит пространственно-временная самоорганизация: пассивная и активная. В пассивной среде процесс осуществляется за счет энергии локального источника, в активной — источник энергии делокализован и распределен по системе.

Общепринятым и наиболее адекватным математическим описанием активных (возбудимых) сред являются системы параболических уравнений типа "реакция—диффузия" [Давыдов и др., 1991]. Однако общей теории активных сред не существует. К настоящему времени известны разнообразные типы структур в однородных активных средах [Васильев и др., 1979; Кернер, Осипов, 1989; Давыдов и др., 1991; Елькин, 2006]:

- распространение уединенного фронта возбуждения;
- распространение импульса стабильной формы;
- автономные локализованные источники;
- стоячие волны;
- вращающиеся вихри (ревербератор);
- синхронные автоколебания в пространстве;
- диссипативные структуры — стационарные во времени неоднородные распределения в пространстве.

В неоднородных активных средах источником автоволн может быть некоторая область пространства, называемая пейсмейкером, в которой соответствующая частота колебаний выше, нежели в окружающей ее среде. Пейсмейкер создает в среде структуру в виде концентрических волн, расходящихся из некоторого центра. При этом в случае нескольких таких источников среда синхронизируется самым высокочастотным из них. Автоволны взаимодействуют между собой: выживает наиболее устойчивая и геометрически простая конфигурация со стоячими волнами. Иначе говоря, вся среда ведет себя подобно набору резонаторов.

Весьма значимую информацию о процессе эволюции автоволновой структуры можно получить, изучая только эволюцию во времени положения фронта волны [Давыдов и др., 1991], что позволяет понизить на единицу размерность задачи. Кинематический подход — весьма эффективное и универсальное средство для исследования эволюции различных автоволновых структур. Следуя работе [Давыдов и др., 1991], будем считать, что автоволна может быть описана путем задания ее ориентированной поверхности фронта. Как известно, всякая поверхность в трехмерном пространстве обладает в каждой своей точке двумя главными радиусами кривизны R_1 и R_2 (или двумя главными кривизнами $K_1 = 1/R_1$ и $K_2 = 1/R_2$). Показано, что скорость нормального смещения участка фронтальной поверхности зависит лишь от суммы главных кривизн, т.е. от удвоенной средней кривизны $2H = K_1 + K_2$ согласно равенству

$$V = V_0 - 2DH,$$

где D — коэффициент (матрица) диффузии; V_0 — скорость в однородной среде.

Заметим, что с формальной точки зрения образом как автоколебаний, так и автосоли-тонов — уединенных стационарных собственных состояний (автосостояний) системы в фазовом пространстве, являются аттракторы, характеризующиеся определенной областью или бассейном притяжения [Кернер, Осипов, 1989].

Проанализируем и сопоставим далее базовые свойства волновых и автоволновых процессов.

Классические линейные волны:

- генерация под действием кинетической компоненты энергии локального источника;
- уменьшение амплитуды и изменение формы по мере распространения;
- наличие интерференции при взаимодействии;

- отражение от препятствий и дифракция на их границах. Они хорошо распространяются в средах, в которых диссипация достаточно мала. В противном случае они быстро затухают;
- перенос энергии.

Автоволны:

- возникают под действием потенциальной компоненты энергии, распределенной в геосреде;
- форма, амплитуда и скорость распространения сохраняются и определяются локальными свойствами геосреды — активной системы;
- скорость распространения автоволнового фронта зависит от его кривизны;
- существует минимальный временной интервал между соседними импульсами (волнами) — время абсолютной рефрактерности, необходимое для восстановления свойств среды после прохождения импульса;
- отражение от препятствий отсутствует, при столкновении аннигилируют — из-за аннигиляции при встрече интерференция отсутствует, т.е. для них нет эффектов интерференции и отражения в обычном смысле, связанных с принципом суперпозиции;
- дифракция на границах препятствий сохраняется;
- энергия автоволновой не переносится, а высвобождается.

Таким образом, пожалуй, единственное свойство, объединяющее автоволны с линейными волнами, — это принцип Гюйгенса, позволяющий говорить о дифракции тех и других. Напомним, что дифракция (огибание волнами препятствий) в современном понимании трактуется как отклонение при распространении волн от законов геометрической оптики [Тимофеев, 2005]. Дифракция, как известно, проявляется у волн любой природы.

В итоге интерферометрия как метод визуализации структуры и процессов в геосреде, основанной на явлении интерференции волн и измерении разностей фаз применительно к автоволновым процессам, оказывается неприменимой. Далее, поскольку принцип Гюйгенса — Френеля применительно к автоволновым процессам не работает, френелевский объем, составляющий физическое содержание луча, не определяется, хотя положение фронта автоволны в последующий момент времени может быть построено по принципу Гюйгенса.

Обратим также внимание на отличие автоволн в активных средах от уединенных волн (солитонов) в нелинейных консервативных средах. В бегущем импульсе имеется баланс между запасенной в системе энергией и ее диссипацией в нем (бегущем импульсе). Солитон же формируется в результате взаимного уравновешивания действия нелинейности и дисперсии в консервативной системе [Кернер, Осипов, 1989]. Свойствами аннигиляции солитоны не обладают. Высота солитонной волны пропорциональна ее скорости.

Отметим также возможность генерации спиральных (геликоидальных) автоволн — незатухающих низкочастотных колебаний, обусловленных наличием магнитного поля в среде распространения.

Таким образом, перенос идей и методов классической акустоэлектромагнитной томографии, существенно опирающихся на физически содержательное понятие луча, на спонтанное шумовое электромагнитное излучение весьма ограничен и проблематичен: в этом случае мы лишаемся понятия "лучевого каркаса", несущего обычное волновое поле. Понятно, что в случае автоволновых представлений наблюдается совершенно иная ситуация: нет картинки пересечения этих волн, автоволны обладают многими особенностями, делающих их резко отличными от обычных волн в консервативных системах. Они не сохраняют и не переносят энергию (они ее высвобождают), но сохраняют форму и амплитуду [Давыдов и др., 1991; Елькин, 2006]. В то же время, как уже отмечалось, самоорганизация геосреды выражается в появлении в ней пространственно-временной масштабной-инвариантной структуры, выходящей за рамки какого-либо одного поля. На энергетических потоках в таких средах могут возникать автоволны с хорошо выраженными границами. Эти среды характеризуются не только наличием потоков вещества (или энергии между отдельными ее точками), но и достаточно сложным поведением ее отдельных элементов. При этом автоколебательный элемент не имеет стационарных состояний и совершает устойчивые автоколебания определенной формы, амплитуды и частоты следования. В итоге в геосреде возникают области, где автоволны в результате взаимодействия гасят друг друга и где наблюдается их установившийся режим. Отмечается большое разнообразие картин, наблюдаются спиральные и свитковые волны — прямое обобщение спиральной волны на трехмерные активные среды [Елькин, 2006]. Оче-

видно, эта пространственно-временная структура поля представляет собой отображение вещественно-энергетической и геометрической структуры объектов. Эта сложная и пестрая картина отображается, проецируется на дневную поверхность, формируя на ней некоторое пространственно-временное распределение интенсивности эмиссионного излучения. В итоге эта сформированная на дневной поверхности структура оказывается изоморфной структуре и динамике геосистем различных уровней и типов организации. Важно, что в этом случае не предусматривается использование какой-либо информации, к примеру, о скоростной модели геосреды; измерение волнового поля, в принципе, может выполняться последовательно в точках регистрации поля вдоль профиля или площади, а не площадной сейсмической группой. Однако, несмотря на простой характер этой конструкции, ее реализация сталкивается с известными трудностями в случае томографии спонтанного электромагнитного излучения. Во-первых, эта картина оказывается сильно зашумленной излучением ионосферно-магнитосферной и атмосферной природы, а также источниками, находящимися в приповерхностных слоях земной коры (теоретически, в скин-слое на заданной частоте). Во-вторых, трудности связаны с особенностями регистрации электромагнитного излучения рассматриваемого нами килогерцового диапазона. Из-за несовершенства инструментальной базы до настоящего времени электромагнитное излучение в килогерцовом диапазоне регистрируется как интегральная интенсивность потока импульсов, при котором весьма затруднительно идентифицировать реальный вид высокочастотного сигнала, что существенно осложняет определение положения его источников.

Напомним, что к основным параметрам, характеризующим электромагнитную эмиссию, относятся:

- общее число импульсов за некоторый исследуемый промежуток времени;
- суммарная или интегральная эмиссия — число превышений сигналом эмиссии установленного уровня за исследуемый промежуток времени;
- интенсивность эмиссии — число превышений сигналом эмиссии установленного уровня в единицу времени;
- амплитуда эмиссии — максимальное значение сигнала в течение заданного промежутка времени;
- уровень сигналов эмиссии — среднее

квадратичное сигнала в рассматриваемый промежуток времени.

На сегодняшний день разработаны и применяются несколько модификаций соответствующей аппаратуры. В частности, в ООО "Юг-нефтегазгеология" разработан специализированный измерительный комплекс "Астрогон" [Богданов и др., 2009]. На основе современной элементной базы и цифровой обработки данных удалось достичь высокой точности ($\pm 5\%$) и большого динамического диапазона (0,055—15 нТл) измерений параметров геомагнитных флуктуаций в диапазоне частот 1,5—70 кГц (по уровню 3 дБ).

Необходимо отметить и известные преимущества измерения числа импульсов перед измерением их интенсивности (огнивающей), поскольку такой подход весьма чувствителен, как следует из наблюдений, к изменению количества (числа) излучателей в геосреде.

Как свидетельствует обширный полевой эксперимент, каждый тип структуры литосферы характеризуется особым характером спонтанного электромагнитного излучения, а пространственные аномалии числа импульсов (интенсивность эмиссии) на земной поверхности имеют упорядоченную структуру [Ларкина и др., 2001; Шуман, Богданов, 2008; Старостенко и др., 2009; Шуман, 2010; Шуман и др., 2011, 2012].

Ясно, что классическая парадигма геосреды как пассивного континуума при развитии методов глубинной локализации излучателей при объяснении этой упорядоченной структуры имеет ограниченное применение, в то время как подходы, основанные на идеях нелинейной динамики, вообще говоря, дают ключи к ее расшифровке.

Как уже упоминалось, многочисленные работы последних лет показали возможность в распределенных возбудимых системах типа "реакция—диффузия" автоволн в виде локализованных стационарных и нестационарных импульсных возмущений, причем эти объекты способны существовать в достаточно широком классе активных (возбудимых) сред. Автоволны могут распространяться многократно вследствие процессов их накачки потенциальной энергией извне, хотя и существует минимальный временной интервал между соседними импульсами — время рефрактерности. Можно сказать, что они свойственны основным базовым моделям возбудимых сред, причем каждый их элемент, в частности, геосреды — некоторая ее область, называемая пейсмейкером или ведущим центром — генерирует последовательность

импульсов с разным интервалом следования. При наличии нескольких пейсмейкеров с разными периодами низкочастотные подавляются высокочастотными, что обусловлено взаимной аннигиляцией автоволн. Возможно формирование некоего установившегося режима.

Укажем также на неизбежность генерации автоволн в разломных зонах литосферы: неустойчивое скольжение в системе блоков обладает всеми признаками автоколебаний [Кузьмин, 2012].

Процессы флюидопереноса в значительной степени также характеризуются и определяют автоволновой динамикой [Дмитриевский, 2008]. Другой важный источник автоволн — ревербератор (спиральная автоволна или автоволновой вихрь). Он образуется в результате разрыва фронта бегущей волны и является наиболее высокочастотным из них. Поэтому при его возникновении он навязывает ритм всей среде, подавляя, в частности, концентрические источники — пейсмейкеры. В отличие от волн, генерируемых пейсмейкером, последовательность импульсов в спиральной волне имеет фиксированный период, определенный свойствами самой среды [Елькин, 2006].

Еще большее разнообразие источников может возникать в трехмерной активной среде [Keener, 1988; Давыдов и др., 1991; Елькин, 2006]. Важный источник бегущих сферически расходящихся волн в неоднородной среде (пейсмейкер) — области, в которых собственная частота колебаний выше, чем в окружающем их пространстве. Прямым обобщением спиральной волны на 3D-пространство является свиток. Вращающаяся на плоскости спиральную волну можно рассматривать в качестве плоского сечения некоторой цилиндрической поверхности — простейшей трехмерной автоволновой структуры. По своим свойствам такой вихрь аналогичен спиральной волне. Роль ядра здесь играет цилиндр, ось которого называют нитью свитка. Эта нить свитка может быть искривлена и, в частности, замкнута в окружность. В результате получается вихревое кольцо. Вихревое кольцо — локальный автоволновой источник. На больших расстояниях от своего центра оно создает сферически расходящиеся волны. Как правило, вихревое кольцо нестабильно. Оно может либо сжиматься, либо расширяться с течением времени. Существенно, что эволюцией вихревого кольца можно управлять с помощью периодической модуляции свойств активной среды. Заметим также, что развитый аппарат кинематического анализа автоволновых струк-

тур пригоден для изучения эволюции автоволн в неоднородных и одновременно нестационарных средах [Давыдов и др., 1991].

Таким образом, имеются веские основания предположить, что источником спонтанной эмиссии может служить набор "независимых" излучателей, генерирующих концентрические автоволны или сферически расходящиеся волны. Другие типичные для этого случая структуры, в частности ревербераторы, лишь зашумляют эту в общем-то прозрачную картину. Тогда по аналогии с гравимагниторазведкой в случае аномального объекта в форме шара приходим к следующему хорошо известному соотношению между размером аномалии L , регистрируемой на земной поверхности, и глубиной погружения H — центром генерации (в частности, пейсмейкера) $H \approx 0,71L$.

Полевой эксперимент свидетельствует о конструктивном характере такого предположения [Богданов и др., 2009; Старостенко и др., 2009; Дурандин, 2011; Шуман и др., 2012]. В итоге построение псевдоразрезов на основе такой глубинной привязки источников спонтанного излучения в литосфере может быть в первом приближении сведено к относительно простому анализу пространственного распределения его интенсивности на земной поверхности или над ней. Эксперимент свидетельствует о ее стабильном характере и на морских акваториях [Шуман и др., 2011]. Ясны и причины сложной мозаики, изрезанности, разорванности пространственной структуры интенсивности электромагнитного излучения, обусловленные, очевидно, наряду с источниками внелитосферного происхождения, разнообразием эмиссионных источников и взаимной аннигиляцией автоволн, генерируемых ими.

Нелинейности структурно-неоднородных сред и методы их диагностики. Изложение было бы неполным, если не затронуть еще один аспект проблемы, касающийся развития методов нелинейной диагностики геосреды. Как известно [Руденко, 2006], в рамках нелинейной акустики нелинейные упругие свойства конденсированных сред и нелинейные волны в них активно изучаются уже более полувека. Этот интерес связан с необычно большими нелинейностями многофазных дефектных и структурно-неоднородных сред, в том числе и геосреды.

Различают три типа нелинейности: геометрическую, физическую и структурную. При этом каждая из них может быть распределена во всем ее объеме или сосредоточена в локальной пространственной области, малой по сравнению

с длиной волны [Руденко, 2006]. Причины, которые приводят к появлению больших (даже гигантских) нелинейностей в структурно-неоднородных средах, весьма разнообразны. В частности, это — наличие в них сильно сжимаемых включений (пузырьков газа или жидкости), трещиноватость среды и др.

Как следует из теории самоорганизации, всякие открытые системы с сильной нелинейностью, как правило, пульсируют. Фундаментальная особенность поведения таких систем — периодичное чередование стадий эволюции и инволюции роста интенсивности процессов и их затухания, интеграции и дезинтеграции, неустойчивость к малым возмущениям. Помимо гигантской нелинейности структурно-неоднородные среды характеризуются также некоторыми другими свойствами, в частности, наличием "доминантной" частоты: вне зависимости от частоты возбуждения колебаний на выходе регистрируется "доминантный" отклик, в то время как другие спектральные составляющие, включая и частоту возбуждения, оказываются достаточно слабыми. Согласно работе [Руденко, 2006], причина такого явления — во внутренних резонансных свойствах и сильной нелинейности, ответственной за перекачку энергии колебаний в эти частоты.

Наличие механизмов переноса энергии колебаний в низкочастотную и высокочастотную области спектра означает, что принимаемый сигнал, прошедший сквозь реальную структурно-неоднородную среду, несет информацию об источнике и трассе своего распространения [Руденко, 2006]. В то время как линейные методы позволяют исследовать объекты, изменяя частоту, фазу, поляризацию и направление распространения волны, при использовании нелинейных явлений используется зависимость отклика среды от амплитуды (интенсивности) зондирующего сигнала. С ростом его амплитуды нарушается принцип суперпозиции: сильные возмущения взаимодействуют между собой и обмениваются энергией. При этом каждая из волн несет как информацию о характеристиках, взаимодействующих с ней, так и о параметрах среды распространения.

Заметим, что в распределенных системах характер колебаний (автоколебаний) существенно зависит от типа нелинейности и особенностей дисперсии ее физических свойств, а наличие диссипации, быстро возрастающей с увеличением частоты или уменьшением пространственного масштаба возмущений, усугубляет ситуацию. В частности, эффекты объемных не-

линейностей способны накапливаться при распространении возмущений, если затухание, дифракция, дисперсия достаточно слабы [Руденко, 2006].

Обратим внимание на один критически важный аспект проблемы — потери устойчивости установившегося режима активной распределенной системы (геосреды), у которой диссипация компенсируется внешней подпиткой и если ее параметры близки к точке бифуркации стационарного режима. Согласно работе [Руманов, 2013], о приближении бифуркации стационарного режима (катастрофы) системы свидетельствует нарастание низкочастотных (мягких) мод в спектре ее шумов. Причем этот вывод о нарастании низкочастотных мод (шумов) в окрестности бифуркации стационарного режима (резонанса на нулевой частоте) является универсальным [Руманов, 2013]. В этом контексте создание сетей мониторинга за шумовой сейсмической и электромагнитной компонентой, создание устройств, информирующих о ее спектре, — одна из актуальных задач современной геофизики. Проблема, однако, состоит в том, что хотя устойчивое состояние системы несомненно существует, область притяжения (бассейн) аттрактора непрерывно изменяется. Это понижает "градус оптимизма", вытекающего из статьи [Руманов, 2013]. И здесь мы снова вынуждены "растекаться по старым следам", так как неясно, как в этом случае будет реализовываться процесс нарастания низкочастотных мод в спектре шумов исследуемой системы. Понятно, что только обширный полевой эксперимент поможет прояснить существо дела. В то же время формирование и развитие этого направления геофизической науки вполне объяснимо, своевременно и обоснованно. Важно, что на основании только экспериментальных данных (временных рядов наблюдений) этот критерий наряду с расчетом таких характеристик, как показатели Ляпунова, энтропии и размерности, дает возможность определять горизонт прогноза рассматриваемого процесса и в ряде благоприятных случаев предсказывать дальнейшую эволюцию системы [Лоскутов, 2010].

Заключение. Важная в прикладном и фундаментальном аспекте проблема восстановления трехмерных изображений физических свойств и структурных характеристик геосреды методами трансмиссионной, дифракционной и эмиссионной томографии несомненно определяет одно из ведущих направлений современной геофизической науки. Становление томографии, как известно, тесно связано с решением обрат-

ной задачи Радона и исследованием некоторых задач интегральной геометрии. Современные методы томографии достаточно успешно описывают те условия, в которых аппарат геометрической оптики оказывается адекватным физике процесса. Однако все еще отсутствуют или, возможно, остаются в тени четкие представления о границах области применимости лучевого подхода к решению томографических задач. Далее, геометрическое приближение, как известно, неустойчиво по отношению к малым возмущениям начальных условий, параметров среды и границ раздела в ней. Следует также обратить внимание на то обстоятельство, что стандартные методы исследования лучевой динамики используют в той или иной форме идею разделения пространственных переменных, что также сужает диапазон возможностей теории.

Было бы нереальной задачей комментировать здесь широкий спектр высказанных по этому поводу мнений и точек зрения. Очевидно, что весьма трудно продвинуться на этом пути, не внося дополнительного понимания о происходящих в геосреде процессах и природе явлений. Тем не менее профессиональные приемы и применяемый аппарат в ряде случаев продолжают доветь над адекватностью подхода, в то время как эксперимент свидетельствует о его неуниверсальности. Применение методов исследования нелинейной динамики вносит "новое измерение" и новые возможности.

Основные предпосылки нового подхода — открытость, нелинейность, энергонасыщенность, кооперативное взаимодействие элементов геосреды на разных масштабных уровнях. Существенно, что эксперимент допускает автовольную трактовку происходящих в геосреде процессов, типичность их хаотического поведения, демонстрирует стабильную во времени картину пространственного распределения энергии сейсмических, сейсмоакустических и электромагнитных шумов литосферного происхождения и возможность локализации их источников.

Известны различные источники автогенерации волн в активных средах. И это не математическая экзотика, а типичное свойство реальной геосреды. Экспериментально обнаружены и описаны характеристики эндогенной сейсмической и электромагнитной эмиссии, установлены теоретические предпосылки ее существования с точки зрения расширенной концепции геосреды как открытой неравновесной нелинейной системы с блочно-иерархической структурой. Развита новая методика локализации объ-

ектов геосреды, в частности на основе критерия степени упорядоченности сейсмоакустических колебаний относительно фона. В русле этих идей и на сходной концептуальной основе могут быть предложены новые методы локализации источников спонтанного электромагнитного излучения. Их принципиальное отличие состоит в том, что информационным сигналом в этом случае служат не отраженные, преломленные или рассеянные волны, а спонтанная компонента электромагнитного шума литосферного происхождения. При этом, что существенно, исследуемый спектр находится в килогерцевой области частот. Однако достаточно сильное затухание электромагнитных волн этого диапазона в литосферной области долгое время являлось психологическим барьером, преодолению которого до настоящего времени не помогали даже очевидные сейчас многочисленные экспериментальные результаты по регистрации электромагнитной эмиссии, достаточно широко представленные в печати.

Заметим, что применение методов исследования нелинейных динамических систем для решения томографических задач связано со значительными трудностями. В известной степени это оправдывает скептицизм некоторых авторов в решении данной задачи. Разумеется, наибольшее практическое значение при этом имеет исследование распределенных трехмерных активных сред, автоволновые процессы в которых несравненно сложнее и разнообразнее, нежели в одномерных. Но, как известно, важную и достаточно полную информацию о процессе эволюции автоволновой структуры мож-

но получить, анализируя только изменение во времени положения фронта возмущения. На этой идее, значительно упрощающей рассмотрение автоволновых процессов, основаны кинематические подходы к их описанию. Ясна также ограниченность нелинейного подхода на базе фазовой плоскости и необходимость выхода с этой плоскости в пространство измерений большей размерности. Тем не менее полученные к настоящему времени на этой основе экспериментальные результаты в области томографии сейсмоакустической и спонтанной электромагнитной эмиссии дают повод для оптимизма при решении ряда прикладных задач по исследованию структуры и динамики геосреды. В этом контексте томографию спонтанной электромагнитной эмиссии литосферы можно рассматривать не только как метод локализации ее источников, но и в более расширенной постановке как общий подход к восстановлению архитектуры геосреды и прогнозу ее поведения путем анализа регистрируемых электромагнитных сигналов, порождаемых самой системой.

Работа выполнена в рамках научного проекта "Комплексное геофизическое изучение глубинного строения, состава и эволюции земной коры с целью определения углеводного ресурсного потенциала Азово-Черноморского региона" и целевой комплексной программы научных исследований НАН Украины "Комплексный мониторинг, оценка и прогнозирование динамики состояния морской среды и ресурсной базы Азово-Черноморского бассейна в условиях увеличивающейся антропогенной нагрузки и климатических изменений".

Список литературы

- Абдуллаев С. С., Заславский Г. М. Классическая нелинейная динамика и хаос лучей в задачах распространения волн в неоднородных средах. *Успехи физ. наук*. 1991. Т. 161. № 8. С. 2—43. [Abdullaev S. S., Zaslavskij G. M., 1991. Classical nonlinear dynamics and chaos of rays in wave propagation problems in inhomogeneous media. *Uspehi fizicheskikh nauk* 161 (8), 2—43 (in Russian)].
- Адушкин В. В., Спивак А. А. Приповерхностная геофизика: комплексные исследования литосферно-атмосферных взаимодействий в окружающей среде. *Физика Земли*. 2012. № 3. С. 3—21. [Adushkin V. V., Spivak A. A., 2012. The near-surface geophysics: integrated studies of lithosphere-atmosphere interactions in the environment. *Fizika Zemli* (3), 3—21 (in Russian)].
- Анищенко В. С. Детерминированный хаос. *Соросов. образоват. журн.* 1997. № 7. С. 70—76. [Anishhenko V. S., 1997. Deterministic chaos. *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal* (7), 70—76 (in Russian)].
- Богданов Ю. А., Бондаренко Н. В., Захаров И. Г., Лойко Н. П., Лукин В. В., Черняков А. М., Чертов О. Р. Аппаратурно-методическое обеспечение метода анализа спонтанной электромагнитной эмиссии Земли. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 4. С. 34—43. [Bogdanov Yu. A., Bondarenko N. V., Zaharov I. G., Lojko N. P., Lukin V. V., Chernjakov A. M.,

- Chertov O.R., 2009. Hardware and methodical support of the method of analysis of spontaneous electromagnetic emission of the Earth. *Geofizicheskij zhurnal* 31 (4), 34—43 (in Russian)].
- Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Москва: Наука, 1970. 718 с. [Born M., Vol'f Je., 1970. Principles of Optics. Moscow: Nauka, 718 p. (in Russian)].
- Ванштейн Л.А. Распространение импульсов. *Успехи физ. наук*. 1976. Т. 118. Вып. 2. С. 339—367. [Vanshtejn L.A., 1976. Pulse propagation. *Uspehi fizicheskikh nauk* 118 (2), 339—367 (in Russian)].
- Васильев А.Н., Романовский Ю.М., Яхно В.Г. Автоволновые процессы в распределенных кинетических системах. *Успехи физ. наук*. 1979. Т. 128. Вып. 4. С. 625—666. [Vasil'ev A.N., Romanovskij Ju.M., Jahno V.G., 1979. Wave processes in distributed kinetic systems. *Uspehi fizicheskikh nauk* 128 (4), 625—666 (in Russian)].
- Виноградов Е.А., Дорофеев И.А. Термостимулированные электромагнитные поля твердых тел. *Успехи физ. наук*. 2009. Т. 179. № 5. С. 449—485. [Vinogradov E.A., Dorofeev I.A., 2009. Thermally stimulated electromagnetic fields of solids. *Uspehi fizicheskikh nauk* 179 (5), 449—485 (in Russian)].
- Вол А., Гилат А. (Л.). Первичные водород и гелий как источники энергии землетрясений. В кн.: *Генезис углеводородных флюидов и месторождений* (Отв. ред. А. Дмитриевский, Б. Валаев). Москва: GEOS, 2006. С. 160—166. [Vol A., Gilat A. (L.), 2006. Thermally stimulated electromagnetic fields of solids. In: *Genesis of hydrocarbon fluids and deposits* (Eds A. Dmitrievskij, B. Valjaev). Moscow: GEOS, 160—166 (in Russian)].
- Геншафт Ю.С. Земля — открытая система: геологические и геофизические следствия. *Физика Земли*. 2009. № 8. С. 4—12. [Genshaft Ju.S., 2009. Earth — an open system: geological and geophysical investigation. *Fizika Zemli* (8), 4—12 (in Russian)].
- Гийон Э., Митеску К.Д., Юлен Ж.-П., Ру С. Фракталы и перколяция в пористой среде. *Успехи физ. наук*. 1991. Т. 161. № 10. С. 121—128. [Gijon Je., Mitesku K.D., Julien Zh.-P., Ru S., 1991. Fractals and percolation in porous media. *Uspehi fizicheskikh nauk* 161 (10), 121—128 (in Russian)].
- Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. Москва: Наука, 1967. 683 с. [Ginzburg V.L., 1967. The propagation of electromagnetic waves in a plasma. Moscow: Nauka, 683 p. (in Russian)].
- Гольгин С.В. Преобразование и восстановление разрывов в задачах томографического типа. Новосибирск: Изд. Ин-та геологии и геофизики СО АН СССР, 1988. 100 с. [Gol'din S.V., 1988. Transformation and recovery of discontinuities in problems of tomographic type. Novosibirsk: IGG SBAS USSR Publ., 100 p. (in Russian)].
- Горбатилов А.В., Степанова М.Ю. Результаты исследований статистических характеристик и свойств стационарности низкочастотных микросейсмических сигналов. *Физика Земли*. 2008. № 1. С. 57—67. [Gorbatikov A.V., Stepanova M.Ju., 2008. Research results of the statistical characteristics and properties of the stationary low-frequency microseismic signals. *Fizika Zemli* (1), 57—67 (in Russian)].
- Горбатилов А.В., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Степанова М.Ю., Овсюченко А.Н. Технология глубинного зондирования земной коры с использованием естественного низкочастотного микросейсмического поля. В кн.: *Изменение окружающей среды и климата*. Т. 1. Сейсмические процессы и катастрофы. Москва: ИФЗ РАН, 2008. С. 223—236. [Gorbatikov A.V., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Stepanova M.Ju., Ovsjuchenko A.N., 2008. Technology depth probing of the crust using a natural low-frequency microseismic field. In: *Change the environment and climate*. V. 1. Seismic processes and catastrophes. Moscow: IPE RAS Publ., 223—236 (in Russian)].
- Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Гершензон Н.И., Пилипенко Н.И. Электромагнитные эффекты при разрушении земной коры. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1985. № 1. С. 72—87. [Gohberg M.B., Gufel'd I.L., Gershenzon N.I., Pilipenko N.I., 1985. Electromagnetic effects in the destruction of the Earth's crust. *Fizika Zemli* (1), 72—87 (in Russian)].
- Гроза А.А. Теоретические основы и методологические принципы кинематических методов электромагнитных зондирований земной коры импульсными источниками: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Киев: ИГФ НАНУ, 1985. 36 с. [Groza A.A., 1985. Theoretical foundations and methodological principles of kinematic methods of electromagnetic sounding crustal pulsed sources: Dr. phys. and math. sci. diss. Kiev: IGF NASU Publ., 36 p. (in Russian)].
- Гульельми А.В. Ультранизкочастотные волны в коре и в магнитосфере Земли. *Успехи физ. наук*. 2007. Т. 177. № 12. С. 1257—1276. [Gul'elmi A.V., 2007. Ultra-waves in the crust and in the Earth's magnetosphere. *Uspehi fizicheskikh nauk* 177 (12), 1257—1276 (in Russian)].
- Гуфельд И.Л. О глубинной дегазации и структуре литосферы и верхней мантии. *Электронный журнал "Глубинная нефть"*. 2013. Т. 1. № 2.

- С. 172—188. [Gufel'd I.L., 2013. About deep degassing and structure of the lithosphere and upper mantle. *Jelektronnyj zhurnal "Glubinnaja neft"* 1 (2), 172—188 (in Russian)].
- Гуфельг И.Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Королев: ЦНИИМам, 2007. 160 с. [Gufel'd I.L., 2007. Seismic process. Physico-chemical aspects. Korolev, 160 p. (in Russian)].
- Гуфельг И.Л., Матвеева М.И., Новоселов О.Н. Почему мы не можем осуществить прогноз сильных коровых землетрясений. *Геодинамика и тектонофизика*. 2011. Т. 2. № 4. С. 378—415. [Gufel'd I.L., Matveeva M.I., Novoselov O.N., 2011. Why can not we implement a prediction of strong crustal earthquakes. *Geodinamika i tektonofizika* 2 (4), 378—415 (in Russian)].
- Давыдов В.А., Зыков В.С., Михайлов А.С. Кинематика автоволновых структур в возбудимых средах. *Успехи физ. наук*. 1991. Т. 161. № 8. С. 45—86. [Davydov V.A., Zykov V.S., Mihajlov A.S., 1991. Kinematics of self-oscillatory structures in excitable media. *Uspehi fizicheskikh nauk* 161 (8), 45—86 (in Russian)].
- Дмитриевский А.Н. Автоволновые процессы формирования флюидонасыщенных зон Земли. *Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы: Материалы Всерос. конференции* (Москва, 22—25 апреля 2008 г.). Москва: GEOS, 2008. С. 6—8 [Dmitrievskij A.N., 2008. Wave processes of formation of fluid-saturated zones of the Earth. *Degassing of the Earth: Geodynamics, geofluids, oil, gas and their parageneses: Proceeding of the IX All-Union conference* (Moscow, 22—25 April 2008). Moscow: GEOS, 6—8 (in Russian)].
- Дурандин А.В. Структурно-тектонический анализ данных дистанционного зондирования Земли. *Геоматика*. 2011. № 1. С. 48—51. [Duran-din A.V., 2011. Structural-tectonic analysis of remote sensing data. *Geomatika* (1), 48—51 (in Russian)].
- Елькин Ю.Е. Автоволновые процессы. *Математическая биология и биоинформатика*. 2006. Т. 1. № 1. С. 27—40. [El'kin Ju.E., 2006. Wave processes. *Matematicheskaja biologija i bioinformatika* 1 (1), 27—40 (in Russian)].
- Зосимов В.В., Лямшев Л.М. Фракталы в волновых процессах. *Успехи физ. наук*. 1995. Т. 165. № 4. С. 362—402. [Zosimov V.V., Ljamshev L.M., 1995. Fractals in wave processes. *Uspehi fizicheskikh nauk* 165 (4), 362—402 (in Russian)].
- Ильинский Ю.А., Келдыш Л.В. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом. Москва: Изд-во МГУ, 1989. 304 с. [Il'inskij Ju.A., Keldysh L.V., 1989. The interaction of electromagnetic radiation with matter. Moscow: MSU Publ., 304 p. (in Russian)].
- Калинин А.В., Влагов М.Л., Золотая Л.А., Кульчицкий Л.М., Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., Хмелевской В.К., Шапаева Н.В. Современная георадиолокация. *Разведка и охрана недр*. 2001. № 3. С. 2—6. [Kalinin A.V., Vladov M.L., Zolotaja L.A., Kul'chickij L.M., Starovojtov A.V., Tokarev M. Ju., Hmelevskoj V.K., Shapaeva N.V., 2001. Modern Georadiolocation. *Razvedka i ohrana nedr* (3), 2—6 (in Russian)].
- Кернер Б.С., Осипов В.В. Автосолитоны. *Успехи физ. наук*. 1989. Т. 157. Вып. 2. С. 201—261. [Kerner B.S., Osipov V.V., 1989. Autosolitons. *Uspehi fizicheskikh nauk* 157 (2), 201—261 (in Russian)].
- Климонтович Ю.Л. Энтропия и информация открытых систем. *Успехи физ. наук*. 1999. Т. 169. № 4. С. 443—453. [Klimontovich Ju.L., 1999. Entropy and information of open systems. *Uspehi fizicheskikh nauk* 169 (4), 443—453 (in Russian)].
- Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Границы применимости геометрической оптики и смежные вопросы. *Успехи физ. наук*. 1980. Т. 132. № 3. С. 475—496. [Kravcov Ju.A., Orlov Ju.I., 1980. The limits of applicability of geometrical optics and related matters. *Uspehi fizicheskikh nauk* 132 (3), 475—496 (in Russian)].
- Кузелев М.В., Рухадзе А.А. К вопросу о расплывании импульсов в диссипативных и неравновесных средах. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1979. Т. 22. № 10. С. 1223—1229. [Kuzelev M.V., Rухадзе A.A., 1979. On the spreading of a pulse in dissipative and non-equilibrium environments. *Izvestija vuzov. Radiofizika* 22 (10), 1223—1229 (in Russian)].
- Кузьмин Ю.О. Деформационные автоволны в разломных зонах. *Физика Земли*. 2012. № 1. С. 3—19. [Kuz'min Ju.O., 2012. Autowaves deformation in fault zones. *Fizika Zemli* (1), 3—19 (in Russian)].
- Курант Р. Уравнения с частными производными. Москва: Мир, 1964. 830 с. [Kurant R., 1964. Partial Differential Equations. Moscow: Mir, 830 p. (in Russian)].
- Ларкина В.И., Мигулин В.В., Сергеева Н.Г., Сеннин Б.В. Исследование динамики литосферы по спутниковым измерениям электромагнитного излучения. *Вестник МГТУ*. 2001. Т. 4. Вып. 1. С. 115—120. [Larkina V.I., Migulin V.V., Sergeeva N.G., Senin B.V., 2001. Study of the dynamics of the lithosphere from satellite measurements of electromagnetic radiation. *Vestnik MGTU* 4, is. 1, 115—120 (in Russian)].

- Левшенко В.Т. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы литосферного происхождения: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва: ОНФЗ РАН, 1995. 36 с. [Levshenko V.T., 1995. Ultra-low frequency electromagnetic signals lithospheric origin: Dr. phys. and math. sci. diss. Moscow, 36 p. (in Russian)].
- Лоскутов А.Ю. Очарование хаоса. *Успехи физ. наук.* 2010. Т. 180. № 2. С. 1305—1329. [Loskutov A.Ju., 2010. Fascination of chaos. *Uspehi fizicheskikh nauk*, 180 (2), 1305—1329 (in Russian)].
- Лукк А.А., Дещерский А.В., Сигорин А.Я., Сигорин И.А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. Москва: ОИФЗ РАН, 1996. 210 с. [Lukk A.A., Deshcherskij A.V., Sidorin A.Ja., Sidorin I.A., 1996. Variations of geophysical fields as a manifestation of deterministic chaos in a fractal environment. Moscow: JIPE RAS, 210 p. (in Russian)].
- Марков Г.Т., Васильев Е.Н. Математические методы прикладной электродинамики. Москва: Сов. радио, 1970. 118 с. [Markov G.T., Vasil'ev E.N., 1970. Mathematical Methods of Applied Electromagnetics. Moscow: Sovetskoe radio, 118 p. (in Russian)].
- Некут А.Г., Спиз Б.Р. Использование электромагнитных методов с контролируемым источником при разведке нефтяных месторождений. *Труды Ин-та инженеров по электронике и радиотехнике (ТИИЭР)*. 1989. Т. 77. № 2. С. 57—85. [Nekut A.G., Spis B.R., 1989. Using electromagnetic methods of controlled source in oil exploration. *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers* 77 (2), 57—85 (in Russian)].
- Николаев А.В. Развитие методов нелинейной геофизики. *Электрон. науч.-информац. журн. "Вестник ОГГГГГ РАН"*. 2002. № 1 (20). 5 с. [Nikolaev A.V., 2002. Development of nonlinear geophysics. *Vestnik OGGGGG RAN* 1, 5 p. (in Russian)].
- Николаев А.В., Алексеев А.С., Цибульчик Г.М., Яновская Т.Б., Сурнев В.Б. Проблемы геотомографии. Москва: Наука, 1997. 331 с. [Nikolaev A.V., Alekseev A.S., Cibul'chik G.M., Janovskaja T.B., Surnev V.B., 1997. Geotomography problems. Moscow: Nauka, 331 p. (in Russian)].
- Николаев А.В., Троицкий П.А., Чеботарева И.Я. Изучение литосферы сейсмическими шумами. *Докл. АН СССР*. 1986. Т. 282. № 9. С. 586—591. [Nikolaev A.V., Troickij P.A., Chebotareva I.Ja., 1986. The study of the lithosphere seismic noise. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 282 (9), 586—591 (in Russian)].
- Руденко О.В. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики. *Успехи физ. наук.* 2006. Т. 176. № 1. С. 77—95. [Rudenko O.V., 2006. Giant nonlinearities in structurally inhomogeneous media and the fundamentals of nonlinear acoustic diagnostic. *Uspehi fizicheskikh nauk* 176 (1), 77—95 (in Russian)].
- Руманов Э.Н. Критические явления вдали от равновесия. *Успехи физ. наук.* 2013. Т. 183. № 1. С. 102—112. [Rumanov Je.N., 2013. Critical phenomena far from equilibrium. *Uspehi fizicheskikh nauk* 183 (1), 102—112 (in Russian)].
- Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Москва: Наука, 1966. 360 с. [Rytov S.M., 1966. Introduction to Statistical Radiophysics. Moscow: Nauka, 360 p. (in Russian)].
- Саговский М.А. Геофизика и физика взрыва. Избранные труды. Москва: Наука, 2004. 440 с. [Sadovskij M.A., 2004. Geophysics and Physics of explosion. Selected Works. Moscow: Nauka, 440 p. (in Russian)].
- Сейсмическая томография (Под ред. Г. Нолета). Москва: Мир, 1990. 416 с. [Seismic tomography (Ed. G. Nolet). Moscow: Mir, 416 p. (in Russian)].
- Старостенко В.И., Лукин А.Е., Коболев В.П., Русаков О.М., Орлюк М.И., Шуман В.Н., Омельченко В.Д., Пашкевич И.К., Толкунов А.П., Богданов Ю.А., Буркинский И.Б., Лойко Н.П., Федотова И.Н., Захаров И.Г., Черняков А.М., Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., Легостаева О.В., Лебедь Т.В., Савченко А.С. Модель глубинного строения Донецкого складчатого сооружения и прилегающих структур по данным региональных геофизических наблюдений. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 4. С. 44—68. [Starostenko V.I., Lukin A.E., Kobolev V.P., Rusakov O.M., Orlyuk M.I., Shuman V.N., Omel'chenko V.D., Pashkevich I.K., Tolkunov A.P., Bogdanov Ju.A., Burkinskij I.B., Lojko N.P., Fedotova I.N., Zaharov I.G., Chernjakov A.M., Kuprienko P.Ja., Makarenko I.B., Legostaeva O.V., Lebed' T.V., Savchenko A.S., 2009. Model of the deep structure of the folded structure of Donetsk and the surrounding structures according to regional geophysical observations. *Geofizicheskij zhurnal* 31 (4), 44—68 (in Russian)].
- Сурков В.В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. Москва: Изд. Моск. инж.-физ. ин-та, 2000. 235 с. [Surkov V.V., 2000. Electromagnetic effects by earthquakes and explosions. Moscow: Moscow Engineering Physics Institute Publ., 235 p. (in Russian)].
- Тимофеев А.В. Геометрическая оптика и явления дифракции. *Успехи физ. наук.* 2005. Т. 175. № 6. С. 637—641. [Timofeev A.V., 2005. Geo-

- metrical optics and the diffraction phenomenon. *Uspehi fizicheskikh nauk* 175 (6), 637—641 (in Russian)].
- Хогоев Е.А., Колесников Ю.И. Применение сейсмомиссионной томографии для изучения геодинамики активных зон. *Технология сейсморазведки*. 2011. № 1. С. 59—65. [Hogoev E.A., Kolesnikov Ju.I., 2011. Application seismoemissionnoy tomography for the study of geodynamics of active zones. *Tehnologija sejsmorazvedki* (1), 59—65 (in Russian)].
- Хугак Ю.И. О локальной структуре одного класса решений однородной системы уравнений Максвелла для изотропной среды. *Докл. АН СССР*. 1985. Т. 282. № 1. С. 61—65. [Hudak Ju.I., 1985. On the local structure of a class of solutions of the homogeneous Maxwell equations for an isotropic medium. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 282 (1), 61—65 (in Russian)].
- Чеботарева И.Я. Новые алгоритмы эмиссионной томографии для пассивного сейсмического мониторинга разрабатываемых месторождений углеводородов. Ч. I: Алгоритмы обработки и численное моделирование. *Физика Земли*. 2010. № 3. С. 7—19; Ч. II: Результат обработки реальных данных. Там же. — С. 20—36. [Chebotareva I.Ja., 2010. New algorithms for emission tomography for passive seismic monitoring developed hydrocarbon deposits. P.I: Processing algorithms and numerical modeling. *Fizika Zemli* (3), 7—19 (in Russian)].
- Чеботарева И.Я. Структура и динамика геосреды в шумовых сейсмических полях, методы и экспериментальные результаты. *Акустика неоднородных сред. Ежегодник РАО*. 2011. Вып. 12. С. 147—156. [Chebotareva I.Ja., 2011. Structure and dynamics of seismic noise in geomedium fields, methods, and experimental results. *Akustika neodnorodnyh sred. Ezhegodnik RAO*, is. 12, 147—156 (in Russian)].
- Шуман В.Н. Электродинамика и отклик геосреды на воздействие внешних электромагнитных полей. *Геофиз. журн.* 2013. Т. 35. № 5. С. 129—149. [Shuman V.N., 2013. Electrodynamics and geomedium response to external electromagnetic fields. *Geofizicheskij zhurnal*, 35 (5), 129—149 (in Russian)].
- Шуман В.Н. Электромагнитная эмиссия литосферы: новые экспериментальные результаты и анализ проблемы. *Геоинформатика*. 2010. № 4. С. 79—93. [Shuman V.N., 2010. Electromagnetic emission of the lithosphere: New experimental results and analysis of the problem. *Geoinformatika* (4), 79—93 (in Russian)].
- Шуман В.Н., Богданов Ю.А. Электромагнитная эмиссия литосферы: пространственная структура и возможные механизмы генерации. *Геофиз. журн.* 2008. Т. 30. № 6. С. 39—50. [Shuman V.N., Bogdanov Ju.A., 2008. Electromagnetic emission of the lithosphere: the spatial structure and possible mechanisms of generation. *Geofizicheskij zhurnal* 30 (6), 39—50 (in Russian)].
- Шуман В.Н., Коболев В.П., Богданов Ю.А., Захаров И.Г., Яцута Д.А. Спонтанное электромагнитное излучение на акваториях: новый эксперимент и приложения. *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 4. С. 33—49. [Shuman V.N., Koboлев V.P., Bogdanov Ju.A., Zaharov I.G., Jacjuta D.A., 2011. Spontaneous electromagnetic radiation in the waters: a new experiment and applications. *Geofizicheskij zhurnal* 33 (4), 33—49 (in Russian)].
- Шуман В.Н., Коболев В.П., Старостенко В.И., Буркинский И.Б., Лойко Н.П., Захаров И.Г., Яцута Д.А. Метод анализа спонтанной электромагнитной эмиссии Земли: физические предпосылки, элементы теории, полевой эксперимент. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 4. С. 40—61. [Shuman V.N., Koboлев V.P., Starostenko V.I., Burkinskij I.B., Lojko N.P., Zaharov I.G., Jacjuta D.A., 2012. Method of analysis of spontaneous electromagnetic emission of the Earth: physical prerequisites, elements of the theory, a field experiment. *Geofizicheskij zhurnal* 34 (4), 40—61 (in Russian)].
- Шуман В.Н., Савин М.Г. Математические модели геоэлектрики. Киев: Наук. думка, 2011. 239 с. [Shuman V.N., Savin M.G., 2011. Mathematical models geoelectrics. Kiev: Naukova Dumka, 239 p. (in Russian)].
- Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes* (Ed. M. Hayakawa), 1999. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 996 p.
- Keener J.P., 1988. The dynamic of 3-dimensional scroll waves in excitable media. *Physica*, D31, 269—276.