

Современные электромагнитные зондирующие системы: состояние, тенденции развития, новые идеи и задачи

© В. Н. Шуман, 2012

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина
Поступила 28 марта 2012 г.
Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

Настоящая смена теории не есть смена уравнений — это смена математических структур.

акад. РАН Ю. И. Манин

Розглянуто сучасний стан та перспективи розвитку електромагнітних зондуючих систем. Обговорено способи та методи розв'язання давніх проблем, нові ідеї та нові задачі. Проаналізовано ключові положення геоелектродинаміки, важливі з точки зору застосувань. Зокрема, з урахуванням фізичного та математичного аспектів проблеми уточнено деякі положення імпедансного підходу в сучасній геоелектриці. Підкреслено необхідність заміни «класичної» електродинамічної парадигми на парадигму фрактальної електродинаміки нестійкого середовища, яка об'єднує фрактальну геометрію і теорію електромагнетизму. Зазначено, що застосування теорії фракталів, детермінованого хаосу, масштабної інваріантності (скейлінгу) та дробних операторів відкриває додаткові можливості і перспективи в обробці даних спостережень та підвищенні інформативності зондуючих систем, орієнтованих їх на одержання якісно нової інформації про геосередовище.

State-of-the-art and opportunities of development of electromagnetic sounding systems are being considered. The ways and methods of solving old problems as well as new ideas and new aims are under consideration. Key principles of geoelectrodynamics important from the viewpoint of applications are analyzed. In particular, a set of propositions of impedance approach to modern geoelectrics are specified taking into account physical and mathematical aspects of the problem. Necessity of changing "classical" electrodynamic paradigm by a paradigm of fractal electro-dynamics of unstable geo-medium, which integrates fractal geometry and the theory of electromagnetism is accentuated. It is noticed that application of the theory of fractals, the determined chaos, scale invariance (scaling) and fractional operators open additional possibilities and prospects in processing of observation data and increase of information capacity of sounding systems orienting them to obtaining qualitatively new information on geo-medium.

Введение. Электромагнитные зондирующие системы — важный компонент современной палитры геофизических методов исследования земной коры. За последние десятилетия теория и практика электромагнитных зондирующих систем с контролируемым и естественным возбуждением поля достигла определенности и совершенства. Многие ее разделы развиты с достаточной полнотой, создан математический аппарат для решения прямых и обратных задач, существенно расширен класс физических моделей и уравнений, используемых для описания взаимодействия электромагнитных возмущений с геосредой и их распространения вдоль границы раздела «земля—воздух». В настоящее время существуют прекрасные и достаточно подробные обзоры, посвящен-

ные этой тематике (см., например, [Труды..., 1989, С. 3—85; Edwards, 2005; Пальшин, 2009; Constable, 2010; Zhdanov, 2010] и др.). В них с достаточной полнотой изложена эволюция концептуальных и технических основ электромагнитных методов, их история становления и направлений дальнейшего развития.

Чтобы избежать повторов и оживить обсуждение, очевидно можно попытаться рассмотреть эти вопросы в более широком контексте или добавить к обсуждению немного личных соображений. В обоих случаях, однако, возникает опасность переключиться и сосредоточиться на темы, лишь отчасти связанные с задекларированными в названии. Переходя к изложению, прошу извинения за выбор столь сомнительной тактики. В настоящей статье

попытаемся сосредоточиться на вопросах и проблемах, решение которых требует более детального, чем принято сегодня, понимания свойств геофизической среды, ее электромагнитного возбуждения и взаимодействия с электромагнитным полем, существование ответов на которые не столь очевидно, а время ожидания этих ответов неопределенно. Не удивительно, если маститые теоретики («акулы» геоэлектрики) сочтут эти попытки поверхностными, а закоренелые практики — неинтересными. Очевидно, здесь трудно обойтись без разочарований и раздражения при обсуждении вопросов, которые мы знаем или думаем, что знаем. В частности, в отношении ряда из них нет полной ясности даже в самой их постановке, в понимании геологических моделей объектов и их физических особенностей. В столь трудно формализуемой ситуации неизбежное распространение получили интуитивные, эвристические идеи и подходы, основанные в ряде случаев на весьма упрощенных и поэтому спорных физических представлениях. Стало ясно, что некоторые утверждения, широко проникающие в геофизическую литературу, на самом деле неточны или заведомо некорректны. Приведем некоторые примеры, дающие представление о сути этих проблем.

Что мы наблюдаем сегодня в магнитотеллурике? Как известно, в основу классической магнитотеллурической (МТ) теории положено явление скин-эффекта как отклик среды на внешнее переменное тангенциальное к границе раздела электромагнитное поле. Начиная с фундаментальных работ А. Н. Тихонова (1950) и Л. Каньяра (1953), в практику магнитотеллурики прочно вошла концепция поверхностного или входного импеданса, а изучение импедансных соотношений на границе раздела «земля—воздух» стало одной из ключевых ее проблем. Существенно, что амплитудные оценки импеданса (тензора импеданса) непосредственно преобразуются в параметры кажущегося сопротивления и обеспечивают физически содержательную визуализацию среды.

Одна из главных проблем МТ-метода — существенные искажения амплитудных оценок импеданса приповерхностными неоднородностями (гальванический эффект) [Бердичевский и др., 1997]. Для их преодоления современная магнитотеллурика делает акцент на интерпретацию фазовых компонент импеданса. Новые элементы этой стратегии — математическая и физическая декомпозиции тензора импеданса, введение фазового тензора импеданса,

позволяющего исключить гальванические искажения [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. Но, безусловно, эта модель — лишь приближение к действительности. В общем случае связь между компонентами электромагнитного поля на дневной поверхности нелокальна и определяется трехмерным распределением электропроводности в исследуемом разрезе.

Как известно, проблема импедансного описания электромагнитного поля на границе раздела «диэлектрик—проводник» имеет сравнительно давнюю историю и довольно обширную библиографию, в которой представлены различные ее аспекты, включая вопросы физической трактовки и методы экспериментальных оценок (см., например, [Senior, Volakis, 1995; Бердичевский, Дмитриев, 2009; Шуман, 2011] и цитируемую там литературу). О конструктивном характере этой эвристической идеи и возможностях ее экспериментальных приложений может свидетельствовать активная дискуссия, которая ведется до настоящего времени в таких ведущих изданиях, как «Успехи физических наук» [Альшиц, Любимов, 2009; Гульельми, 2010], «Письма в ЖЭТФ [Гульельми, 2009а,б]. Эта дискуссия продолжается и в геоэлектрике, отличаясь некоторой специфичностью постановки задачи [Дмитриев, Бердичевский, 2002; Шуман, 2010а; Шуман, Савин, 2011]. Однако эти дискуссии идут как бы в различных плоскостях. Они слабо связаны между собой, а имеющиеся в физических изданиях упоминания или указания на возможность использования полученных результатов в геофизике довольно фрагментарны и не вполне корректны [Шуман, Савин, 2011].

Очевидно, недостаточно четкие представления о сути рассматриваемого вопроса породило в среде геоэлектриков излишне оптимистические взгляды на возможность импедансных измерений и «типперизации» магнитотеллурики, критериях мономодальности МТ-отклика на земной поверхности и средствах его описания, адаптированных к 3D инверсии наблюдаемых данных. С целью расширения возможностей классической магнитотеллурики, в которой обычно используется тензор импеданса Z_{τ} , определяемый из соотношения между тангенциальными составляющими комплексных электрического \mathbf{E} и магнитного \mathbf{H} полей:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = Z_{\tau} [\mathbf{H} - \mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{H})], \quad (1)$$

в работе [Дмитриев, Бердичевский, 2002] предпринята попытка введения обобщенной модели тензора импеданса для случая, когда пер-

вичное поле содержит заметную вертикальную магнитную составляющую H_z и, следовательно, не может быть приближено плоской волной

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = [Z']\mathbf{H}, \quad (2)$$

где

$$[Z'] = \begin{bmatrix} Z'_{xx} & Z'_{xy} & Z'_{xz} \\ Z'_{yx} & Z'_{yy} & Z'_{yz} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Согласно уравнению (2), обобщенный тензор входного импеданса Z' состоит из шести компонент, связывающих амплитуды горизонтальной составляющей электрического поля \mathbf{E}_τ (E_z полагается равным нулю) с полным магнитным полем \mathbf{H} .

Но и эта модель и с формальной, и с физической точек зрения отнюдь не универсальна: компонента H_z при переходе через границу раздела в общем случае может претерпевать разрыв, а признание в среде горизонтально распространяющейся волны хотя бы только магнитного типа, содержащей H_z , существенно затрудняет возможности корректного определения компонент обобщенного тензора импеданса.

В рассматриваемом контексте заметим, что наши представления о магнитосферно-ионосферно-атмосферных процессах в последние годы претерпели существенные изменения. Соответственно изменились и наши представления о физических механизмах формирования электромагнитного отклика, регистрируемого на земной поверхности. Во-первых, в магнитосферных исследованиях в отличие от традиционного подхода, где базовым процессом является «пересоединение» магнитных силовых линий, в качестве такого рассматривается трансформация кинетической энергии солнечного ветра в электромагнитную во фронте головной ударной волны [Пономарева, Седых, 2006]. Во-вторых, новый подход к данной проблеме стимулировала концепция обобщенной глобальной электрической цепи, включающей в себя генератор ЭДС на внешней границе магнитосферы (магнитопаузы), управляемый солнечным ветром, атмосферные генераторы электрического поля в нижней атмосфере (грозы), электрически связанные с ионосферой и магнитосферой вдоль геомагнитных силовых линий. Глобальная токовая цепь позволяет рассматривать магнитосферу, ионосферу, атмосферу и литосферу в качестве единой электродинамической системы.

Существенно, что в таком случае основная часть тороидального магнитного поля в зем-

ной атмосфере не генерируется радиальным (вертикальным) током в окрестности пункта наблюдений, как это предполагалось ранее, а обусловлена продольными (полоидальными) токами вне ее, причем под ионосферой, в основном, фиксируются магнитные возмущения, генерируемые токами Холла. Однако сложность проблемы состоит в том, что ионосфера и литосфера — омические среды, где электрическое поле и ток связаны законом Ома, в то время как в магнитосфере прямой связи нет. Кроме того, земная атмосфера — не идеальный изолятор, а сама Земля обладает собственным геомагнитным полем, что также существенно влияет на формирование электромагнитного отклика на ее поверхности. В итоге из-за эквипотенциальности магнитных силовых линий геомагнитного поля ток в ионосфере определяется магнитосферным электрическим полем, а ток в магнитосфере — распределением газового давления [Пономарева, Седых, 2006].

Наличие слабопроводящей атмосферы заставляет продольные токи вдоль силовых линий геомагнитного поля замыкаться на ионосферу, ток в которой — комбинированный. В нем всегда имеется и педерсеновская, и холловская составляющие. Однако, хотя сама структура продольных токов больших масштабов по данным спутниковых измерений изучена относительно подробно, падение потенциала и величину тока в глобальной электрической цепи из-за ограниченности экспериментальных данных в настоящее время оценить достаточно сложно. Следовательно, можно констатировать, что, вообще говоря, достоверно неизвестны характеристики как источников, так и генерируемых ими полей. В этом контексте задачи глубинного электромагнитного зондирования в общем случае следует отнести к смешанным, когда по некоторым известным (или предполагаемым) характеристикам исследуемого разреза и данным об электромагнитном поле определяются неизвестные параметры разреза и, если необходимо, самого поля. Ясно, что с целью упрощения задачи обычно используются различные приближения или «эмпирические» закономерности поведения электромагнитного отклика. В частности, для более полного воспроизведения экспериментальных результатов в работе [Кувшинов, 2004] предложена модель «реалистического источника», которая строится в виде разложения по индивидуальному набору сферических гармоник на основе анализа только тангенциальных компонент вариаций геомагнитного поля при некотором заданном

радиально-симметричном разрезе. Тем не менее из изложенного кажется очевидным, что желаемый уровень теории все еще не достигнут и нуждается в развитии. Предельно ясно, что отмеченные обстоятельства являются также причиной многих затруднений, свойственных классическому импедансному подходу [Шуман, 2008; 2010а; Semenov, Shuman, 2010; Шуман, Савин, 2011].

Почему же эта теория (МТ-тензора импеданса) привлекает так много внимания профессионалов (многие из них настолько уверены в ее реальности, что это препятствует осознанию пределов ее применимости и, более того, полагают, что чего-то другого и не требуется) и молодых людей? Возможно, ее привлекательность связана с тем обстоятельством, что она математически изящна и, что существенно, обещает работу. Но, быть может, она все же нуждается в изменении? Разумеется, я не хотел бы, чтобы меня поняли так, что надо как-то отговаривать молодых людей (в отношении профессионалов это исключено) специализироваться в этой области, но, кажется, им все же нужно предоставить и альтернативы.

Одна из возможных альтернатив («дорога в будущее» по образной терминологии М. С. Жданова) представлена в работе [Zhdanov, 2010]: «Будущее развитие ЭМ методов будет основано на новых открытиях в области измерений, обработки и интерпретации данных. Будущий успех ЭМ разведки будет сопряжен с развитием площадных систем наблюдений, аналогичных сейсмическим системам сбора данных. В развитие интерпретации:

- быстрое и точное трехмерное моделирование;
- быстрая обработка изображений;
- крупномасштабная трехмерная инверсия.

Теория регуляризации будет играть ключевую роль в решении этих проблем».

Несомненно, все эти соображения, относящиеся к будущему, весьма важны и актуальны, но существует ли такая альтернатива применительно к магнитотеллурике уже сегодня? Очевидно на этот вопрос можно дать положительный ответ. В частности, в работах [Шуман, 2010а; Шуман, Савин, 2011] предложена система векторных импедансных тождеств локального и нелокального типов для гармонического электромагнитного поля на замкнутых гладких границах раздела сред, генерируемое на их основе обобщенное дифференциальное уравнение импедансов и система скалярных уравнений, определяющих эту границу. Эти

уравнения являются точными и зависят от всех шести компонент электромагнитного поля, регистрируемых на рассматриваемой границе, и подлежат корректному экспериментальному определению. При этом, если по тем или иным причинам на практике используются их неполные, усеченные формы, они содержат, в отличие от классического описания, внутренние критерии применимости и не требуют для своего обоснования дополнительных эвристических или эмпирических соображений. Однако модели тензора импеданса, тензора Визе—Паркинсона, импедансного приближения Леонтовича, несмотря на их частный, приближенный характер, пользуются удивительной привязанностью и доверием подавляющего большинства геоэлектриков.

Отметим и некоторые тревожные моменты в развитии магнитотеллурики. В частности, обращает на себя внимание нарастание количества проектов, посвященных компьютерному моделированию на основе экспериментальных данных, часто неполных, фрагментарных, собранных другими исследователями. Не всегда ясны и очерчены задачи такого моделирования, что делает его зачастую оторванным от решения реальных задач современной геологии. Другой тревожный момент — недостаточное внимание к междисциплинарным проектам, что ведет к замыканию в кругу собственных проблем геоэлектрики, и было бы ошибочным сводить их к чисто техническим или технологическим аспектам.

Приведем еще одну выдержку из цитируемой статьи М. С. Жданова [Zhdanov, 2010]:

«Важным направлением дальнейших исследований является многомерное моделирование и решение обратных задач, а также новый подход к формулированию и интерпретации основных уравнений электромагнитных полей, основанный на представлении электромагнитного поля с помощью потока и напряжения...».

Далее речь пойдет о том, что уравнения Максвелла могут быть получены непосредственно из математической теории дифференциальных форм [Zhdanov, 2010, Appendix A.]. При этом физический смысл полей, появляющихся в уравнениях Максвелла, не анализируется и не рассматривается. Разумеется, практическое использование той или иной теории во многом является делом вкуса. Однако, боюсь, такой подход, не проясняя существо или физику дела, может дать повод к новым алгебраическим упражнениям, как это уже неоднократно случилось. В рассматриваемом контексте об-

ратим внимание на два существенных аспекта. Первый из них относится к определению электрического поля \mathbf{E} и магнитной индукции \mathbf{B} , физический смысл которых, согласно Розенфельду, вытекает непосредственно из выражения силы Лоренца для движущейся со скоростью \mathbf{v} пробной частицы с зарядом q :

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]. \quad (3)$$

Безусловно, это определение верно для вакуума, но не соответствует случаю конденсированных сред; любая заряженная частица, движущаяся в среде, испытывает влияние этой среды. Частица поляризует среду и теряет энергию, что приводит к дополнительной силе, причем эта сила зависит от вида материальных уравнений. Чтобы в данном случае воспользоваться постулатом Розенфельда, необходимо знать явный вид этой силы [Виноградов, 2002].

Существует другой путь определения полей, связанный с установлением граничных условий и являющийся их следствием — метод полости [Виноградов, 2002]: поле внутри полости равно $\mathbf{E}(\mathbf{H})$, если полость вытянута вдоль силовых линий. Если же полость сплюснута, то поле в ней равно $\mathbf{D}(\mathbf{B})$. Законность максвелловских граничных условий может быть доказана экспериментально или с помощью микроскопической теории, описывающей структуру переходного слоя. Важно, что определение полей с использованием полости и граничных условий делает эти поля измеримыми и придает физический смысл решению рассматриваемой электромагнитной проблемы.

Возможно, при решении этого вопроса можно было бы воспользоваться определением полей, данным Ю. И. Маниным: электромагнитное поле — связность в пространстве внутренних степеней свободы квантового электрона, управляющая его эволюцией в пространстве-времени [Манин, 2008]. Однако такой продвинутый подход к определению полей пока остается слишком дистанцированным от практических задач электродинамики сплошных сред и ее геофизических приложений.

Второй аспект касается форм записи уравнений Максвелла. Как известно, макроскопические уравнения Максвелла в среде могут быть представлены в разных формах. В частности, это форма, предложенная Ландау и Лившицем, и форма, предложенная Борном и Федоровым (форма Казимира) [Виноградов, 2002]. Физически это обусловлено, в первую очередь, способом определения индуцированных в среде токов. Так, если ввести полную индукцию

$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + 4\pi\mathbf{P}(\mathbf{r}, t)$, которая учитывает все эффекты движения зарядов и токи намагничивания, а поляризация $\mathbf{P}(\mathbf{r}, t)$ включает в себя весь индуцированный ток без разделения на отдельные вклады, то система уравнений Максвелла примет вид

$$\begin{aligned} \operatorname{rot}\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}, \\ \operatorname{div}\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) &= 0, \\ \operatorname{rot}\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) &= \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{J}_{\text{ext}}(\mathbf{r}, t), \\ \operatorname{div}\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) &= 4\pi\rho_{\text{ext}}(\mathbf{r}, t), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\mathbf{J}_{\text{ext}}(\mathbf{r}, t)$ и $\rho_{\text{ext}}(\mathbf{r}, t)$ — сторонние токи и заряды.

Если же представляется удобным или целесообразным разделить наведенные токи на ток свободных носителей, ток поляризации связанных зарядов и вихревой ток намагничивания, то обычно вводят 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 $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) - 4\pi\mathbf{M}(\mathbf{r}, t)$. При этом в поляризации среды $\mathbf{P}(\mathbf{r}, t)$ можно учесть вклад токов свободных и связанных носителей заряда. Тогда вектор намагниченности среды $\mathbf{M}(\mathbf{r}, t)$ будет определять вихревые токи. В итоге система уравнений Максвелла в среде будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot}\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}, \\ \operatorname{div}\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) &= 0, \\ \operatorname{rot}\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) &= \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{J}_{\text{ext}}(\mathbf{r}, t), \\ \operatorname{div}\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) &= 4\pi\rho_{\text{ext}}(\mathbf{r}, t). \end{aligned} \quad (5)$$

Разумеется, обе формы должны давать эквивалентное описание электромагнитных явлений. При этом граничные условия и материальные уравнения должны быть сформулированы в соответствии с конкретными особенностями задачи и моделью среды [Бредов и др., 1985].

В отличие от системы (4), система (5) содержит четыре вектора — \mathbf{E} , \mathbf{D} , \mathbf{H} и \mathbf{B} . Система (4) вектор \mathbf{H} не содержит. При этом и система (4), и система (5) содержат избыточное число неизвестных и должны быть дополнены связывающими их материальными уравнениями, в которых и сосредоточена информация об индивидуальных свойствах среды. В общем

случае эти характеристики представляют собой интегральные операторы по пространству и времени (в Фурье-компонентах — функции круговой частоты ω и волнового вектора \mathbf{k} ; в этом случае это комплексные феноменологические параметры). Для стандартной модели сплошной среды они однозначно определяются для физически бесконечно малых объемов и не зависят от рассматриваемого объема. При этом последовательное определение диэлектрической и магнитной проницаемостей, как уже упоминалось, подразумевает разбиение индуцированного в среде тока на части, одна из которых ответственна за электрическую поляризацию, а другая — за намагничивание.

Такая модель среды и поля а) включает достаточно информации, чтобы решить любую электромагнитную задачу и б) составляет фундамент современной геоэлектрики. Но, как известно, решение уравнений электродинамики в материальных средах исключительно разнообразны, что обусловлено разнообразием самих свойств сред. При этом развитие и совершенствование методов геоэлектрических исследований приводит к необходимости учета новых свойств или находящихся в специфических условиях сред, и в этом контексте, очевидно, можно и нужно видеть перспективы их дальнейшего развития. В данном ключе и продолжим дальнейшее рассмотрение вопроса.

Геосреда и зондирующие системы. Как уже отмечалось, система макроскопических уравнения Максвелла с заданными линейными материальными условиями составляет фундамент современной электродинамики сплошных сред и, за некоторыми исключениями, является доминирующей в современной теории квазистационарной геоэлектрики [Светов, 1984; 2008]. Вошло в норму и стало традицией рассматривать земную кору при изучении ее взаимодействия с электромагнитным полем в качестве пассивного объекта, и это оправдано во многих случаях, но далеко не всегда.

Как свидетельствует полевой эксперимент, на земной поверхности наблюдается большое разнообразие электромагнитных возмущений различной природы, регистрируемых в исключительно широком диапазоне частот — от 10^{-4} до 10^6 Гц и выше. Одни из них возбуждаются источниками в атмосфере (грозовые разряды, предгрозовое излучение), другие — в магнитосфере и ионосфере в результате взаимодействия солнечного ветра с геомагнитным полем или проникают в магнитосферу из межпланет-

ной среды, третьи генерируются внутриземными источниками.

Как свидетельствует опыт развития геофизической науки, мы постоянно сталкиваемся с новыми или старыми, но находящимися в необычных условиях средами. Стало очевидным, что весьма проблематично предложить единую электродинамическую модель геосреды, удовлетворительно описывающую электромагнитные явления и процессы в столь обширном диапазоне частот в 10—12 порядков. При решении прикладных задач возникла необходимость обобщения стандартной линейной модели [Шуман, Савин, 2011]. В частности, предприняты попытки рассматривать геоэлектрическую модель геосреды в качестве некоего фонового скелета, обладающего проводящими диэлектрическими и магнитными свойствами, и плазмopodobного компонента («наполнителя»), состоящего из многочастичной электронно-ионной фракции, находящейся в подмагничивающем поле земного ядра. В ней могут одновременно присутствовать и свободно движущиеся заряды, совершающие колебательные и вращательные движения [Гололобов и др., 1995; Шуман, Савин, 2011]. Но и такое обобщение оказалось явно ограниченным. К настоящему времени стало предельно ясно, что геосреда — очень специфический объект исследований. Она не может рассматриваться в качестве пассивного континуума — ей присуща внутренняя самоподобная структура. Она непрерывно подвергается воздействию внутренних и внешних сил, на нее постоянно действуют флуктуационные и периодические возмущения. Она является электродинамически активной средой, способной генерировать электромагнитное поле.

Очевидно, в рамках таких представлений геосреда, стремящаяся к самоорганизации, нуждается в новых моделях описания и анализа, которые бы позволили анализировать диссипацию поступающей в нее из низов литосферы энергии, релаксацию локальных напряжений, стационарные режимы деформирования, вопросы генерации и распространения акустосейсмических и электромагнитных возмущений.

Как известно, диссипативные твердотельные структуры, самоорганизующиеся в открытых системах, являются фрактальными: если вещество не находится в газообразном состоянии, то оно, как правило, имеет в некотором диапазоне масштабов фрактальную структуру [Зосимов, Лямшев, 1995].

Чем обусловлен интерес к подобным структурам в геоэлектрике? Прежде всего тем, что фрактальные среды, сформированные в условиях диссипации поступающей из низов литосферы энергии и являющиеся самоорганизованными структурами, приобретают необычные свойства, которые невозможно получить при традиционных способах формирования структурного состояния вещества земной коры. Заметим, что такое видение проблемы способствовало появлению нового направления электромагнитной теории сред, объединяющей фрактальную геометрию и электромагнетизм.

Очевидно, производимая стандартная процедура усреднения по пространству в такой среде позволяет в некоторых случаях эффективно использовать аппарат классической электродинамики сплошных сред, но исключает из рассмотрения ее детали, которые зачастую могут оказаться более значимыми для решения ряда прикладных задач [Шуман, 2012а]. Однако электродинамическое описание таких сред связано со значительными трудностями, обусловленными зависимостью их макроскопических электромагнитных параметров от рассматриваемого объема, что делает невозможным применение стандартной модели сплошной среды, в которой они определяются однозначно для физически бесконечно малых объемов [Потапов, 2000; Болотов, 2002; Тарасов, 2009; Боголюбов и др. 2009; Шуман, 2012а].

Электродинамика фрактальных сред также оперирует физическими величинами, усредненными, однако, по «физически малым» фрактальным элементам объема. В итоге ключевым элементом здесь является процедура усреднения, построение которой оказывается возможной с использованием фрактальных и мультифрактальных мер [Болотов, 2002; Боголюбов и др., 2009]. Следовательно, достаточно полное описание процессов взаимодействия электромагнитного поля со средой, процессов обработки сигналов, генерируемых в ней, становится невозможным или проблематичным с помощью стандартных алгоритмов и формул, полученных на основе представлений электромагнитного отклика в пространстве целочисленной меры и гладких функций. Очевидно, эти идеи и подходы позволяют с иных позиций подойти к анализу возможностей зондирующих систем и решаемым ими задачам, которые вполне логично отнести к неклассическим. Это открывает новые и неожиданные перспективы и возможности создания зондирующих систем,

ориентированных на изучение свойств геосреды, ее текущего состояния и, возможно, прогноза поведения [Шуман, 2010б; 2011; 2012в].

Заметим также, что идеи о самоорганизации и образовании диссипативных структур в открытых системах оказались очень плодотворными с точки зрения того, чтобы перебросить мост между физикой, геофизикой и геологией. В частности, наблюдаемый повсеместно сейсмoeлектромагнитный шум литосферы может интерпретироваться в качестве проявления детерминированного хаоса в иерархически структурированной фрактальной среде. Существенно, что образование фрактальных агрегатов резко увеличивает мощность создаваемого в среде излучения, которое обладает упорядоченной пространственной структурой, тесно связанной со строением и динамикой геосреды, в частности с топологией ее межблочной структуры. При этом фракталы заставляют пересмотреть традиционные взгляды на геометрические свойства объектов в геосреде, а динамический хаос, свойственный большей части динамических систем, вносит существенные изменения в понимание того, как эти объекты могут вести себя во времени. Это позволяет ставить задачи реконструкции динамических систем, их идентификации, возможностей прогноза и управления, совершенно нетипичные для классических методов геофизики. В частности, нелинейные сейсмические, электромагнитные и другие геофизические процессы в геосреде имеют широкий спектр проявлений и могут быть использованы с целью диагностики ее структуры и состояния. В качестве примера новых методов геофизической разведки отметим такие, как метод эмиссионной томографии, ориентированный на реконструкцию пространственного распределения плотности мощности эмиссионного сейсмоакустического излучения литосферы, и метод анализа спонтанной электромагнитной эмиссии Земли, также генерированной литосферой в широком диапазоне частот [Спивак, Кишкина, 2004; Шуман, 2010б, в; 2012б]. И, наконец, такой обновленный взгляд на геосреду, механизмы генерации формирования и распространения в ней акустосейсмoeлектромагнитных взаимодействий и преобразований в морской среде в присутствии постоянного магнитного поля земного ядра позволяет понять тот экспериментально установленный замечательный факт, что пространственная структура плотности импульсного потока электромагнитного излучения (ЭМИ), регистрируемого на поверхности

водной среды или над нею, в воздухе, содержит информацию о строении и динамике среды под морским дном. Последнее обстоятельство с точки зрения классических воззрений о механизмах генерации ЭМИ, их распространении к дневной поверхности и представлений электродинамики сплошных сред казалось совершенно невозможным, лишенным физических оснований [Шуман и др., 2011].

Заключение. Оценивая в целом современное состояние, тенденции и направления развития теории и практики электромагнитных зондирующих систем, можно отметить следующие обстоятельства.

В области геоэлектрических методов с естественным возбуждением поля — используемые связи непосредственно между компонентами электромагнитного поля, регистрируемыми на дневной поверхности (тензор импеданса, обобщенный тензор импеданса, тензор Визе — Паркинсона и др.), носят частичный характер и справедливы только при специальных формах задания поля. Понятно, что проблема импедансного описания электромагнитного отклика на поверхности Земли с учетом возможного присутствия тороидальной компоненты магнитного поля в слабопроводящей атмосфере, традиционно рассматриваемая на основе эмпирических или эвристических соображений, все еще остается актуальной. При этом обычно используемая трактовка механизмов возбуждения реальной Земли как «индукционного» или «гальванического» является весьма ограниченной [Шуман, Савин, 2011].

Можно предположить, что неверно выбранная парадигма во многом способствует и является причиной затруднений, свойственных классической теории глубинных зондирующих систем. С этой точки зрения ориентация только на технологические приемы, совершенствование измерений, обработки и интерпретации, несмотря на свою значимость и актуальность, сильно ограничивают поиск и подавляют появление новых идей. С точки зрения геоэлектрических приложений интерес представляют векторные импедансные тождества локального и нелокального типа для гармонического электромагнитного поля на замкнутых регулярных границах раздела сред и генерируемые на их основе дифференциальное уравнение импедансов и система скалярных уравнений, определяющих эту границу. При этом входящие в них скалярные параметры (импедансы) подлежат, в отличие от тензорного описания, корректному экспериментальному определению.

В области геоэлектрики с контролируемым возбуждением актуальна проблема создания зондирующих систем высокого разрешения. В частности, методов нелинейной акустоэлектромагнитной диагностики геосреды, физической основой которых могут служить объемные нелинейности структурно-неоднородных многофазных сред. Явление прямого и обратного электромагнитно-акустического преобразования — один из примеров такого рода [Шуман, 2012в].

На основе представлений о геосреде как открытой нелинейной диссипативной динамической системы становится очевидной необходимость смены «детерминистской» парадигмы изучения геосреды и динамических процессов в ней на парадигму нестационарных флуктуаций геофизических полей как естественного физического явления, не требующего специального приготовления. Отличительным признаком нелинейных диссипативных систем — волновая (автоволновая) и резонансная природа процессов, большая роль малых возмущений. При рассмотрении таких систем, понимании свойств и механизмов генерации и распространения сейсмоэлектромагнитного шума как естественного физического явления определяющее значение имеет известная флуктуационно-диссипативная теорема, связывающая спонтанные флуктуационные системы с ее диссипативными свойствами.

Еще один важный аспект проблемы — учет фрактальной структуры среды. Фракталы, рассматриваемые как «мгновенные» срезы самоорганизованных критических процессов, способствуют пересмотру взглядов на геометрические свойства объектов в геосреде, а динамический хаос вносит существенные изменения в понимание того, как эти объекты могут вести себя во времени.

Можно предположить, что нелинейные сейсмоакустические и электромагнитные процессы, имеющие широкий спектр проявлений, могут быть эффективно использованы при решении актуальных задач геофизики. Иллюстрацией сказанного является метод эмиссионной томографии, реконструирующий пространственное распределение плотности мощности излучения земных недр, и в некотором смысле его электромагнитный аналог — метод анализа спонтанной электромагнитной эмиссии Земли (МАСЭМЭЗ). Отчетливо видны и трудности применения нелинейно-динамического подхода к изучению геосреды, обусловленные

их необычностью, сложностью, отсутствием необходимой информации о ее свойствах на глубине, принципах межсистемных взаимодействий, возможностью различного физического содержания процессов на разных уровнях ее структурной организации.

И, наконец, совершенно новое направление исследований — это решение задач, связанных с управлением процессами в геосреде и поисками возможностей осуществления управляющего (в частности, электромагнитного) воздействия на относительно коротких временных интервалах. Идея управления может состоять в том, чтобы воздействовать на среду,

комбинируя (согласовывая) контролируемое и естественно-шумовое воздействие [Шуман, 2010б; 2011]. Это неизбежно заставляет придавать больший вес, значение и роль мониторинга за геофизическими процессами, углубленной обработке получаемой информации в реальном масштабе времени.

Таким образом, перспективы развития и сфер применения электромагнитных зондирующих систем представляются весьма привлекательными и даже захватывающими. Существенно, что этот вывод следует как из экспериментальных наблюдений, так и теоретических представлений и оценок.

Список литературы

- Альшиц В. И., Любимов В. Н. Обобщение приближения Леонтовича для электромагнитных полей на границе диэлектрик — металл // *Успехи физ. наук.* — 2009. — **179**, № 8. — С. 865—871.
- Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И. Модели и методы магнитотеллурики. — Москва: Научный мир, 2009. — 680 с.
- Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И., Новиков Д. Б., Пастушан В. В. Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. — Москва: Диалог МГУ, 1997. — 161 с.
- Боголюбов А. Н., Потапов А. А., Рехвиашвили С. М. Способ введения дробного интегрирования в классической электродинамике // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика и астрономия.* — 2009. — № 4. — С. 9—15.
- Болотов В. Н. Обобщенная функция Кантора и переходное фрактальное рассеяние // *Журн. техн. физики.* — 2002. — **72**, вып. 2. — С. 8—15.
- Бредов М. М., Румянцев В. В., Топтыгин И. Н. Классическая электродинамика. — Москва: Наука, 1985. — 399 с.
- Виноградов А. П. К вопросу о форме материальных уравнений в электродинамике // *Успехи физ. наук.* — 2002. — **172**, № 3. — С. 363—370.
- Гололобов Д. В., Москвичев В. Н., Стагник Ю. Н. Аналитическое и экспериментальное исследование взаимодействия электромагнитных волн с углеводородными залежами // *Геология нефти и газа.* — 1995. — № 3. — С. 26—30.
- Гульельми А. В. Инерционные эффекты в коре и в магнитосфере земли // *Физика Земли.* — 2008. — № 1. — С. 50—56.
- Гульельми А. В. К 70-летию формулировки граничного условия Леонтовича (отклик на статью Альши-
- ца В. И. и Любимова В. Н. «Обобщение приближения Леонтовича для электромагнитных полей на границе диэлектрик — металл»)// *Успехи физ. наук.* — 2010. — **130**, № 1. — С. 105—106.
- Гульельми А. В. О граничном условии Леонтовича в геоэлектромагнетизме // *Физика Земли.* — 2009а. — № 9. — С. 12—15.
- Гульельми А. В. О фиктивной нелинейности поверхностного импеданса земной коры // *Письма в ЖЭТФ.* — 2009б. — **89**, вып. 7. — С. 439—442.
- Дмитриев В. И., Бердичевский М. Н. Обобщенная модель импеданса // *Физика Земли.* — 2002. — № 10. — С. 106—112.
- Зосимов В. В., Лямшев А. М. Фракталы в волновых процессах // *Успехи физ. наук.* — 1995. — **165**, № 4. — С. 362—402.
- Кувшинов А. В. Электромагнитная индукция в сферических моделях Земли с трехмерным распределением электропроводности: Автореф. дис.... д-ра физ.-мат. наук. — Москва, 2004. — 42 с.
- Манин Ю. И. Математика как метафора. — Москва: Изд-во МЦНМО, 2008. — 450 с.
- Пальшин Н. А. Проблемы электромагнитных зондирований на экваториях // *Геофиз. журн.* — 2009. — **31**, № 4. — С. 78—92.
- Пономарева Е. А., Сегых П. А. Как разрешить проблему суббурь? // *Геомагнетизм и астрономия.* — 2006. — **46**, № 4. — С. 560—575.
- Потапов А. А. Фракталы в дистанционном зондировании // *Успехи современной радиоэлектроники.* — 2000. — № 6. — С. 3—65.
- Светов Б. С. Основы геоэлектрики. — Москва: Изд-во ЛКИ, 2008. — 656 с.

- Светов Б. С. Электродинамические основы квазистационарной геоэлектрики. — Москва: Изд. Ин-та земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн АН СССР, 1984. — 183 с.
- Спивак А. А., Кишкина С. Б. Исследование микросейсмического фона с целью определения активных тектонических структур и геодинамических характеристик среды // Физика Земли. — 2004. — № 7. — С. 35—49.
- Тарасов В. Е. Дробные интегро-дифференциальные уравнения для электромагнитных волн в диэлектрических средах // Теорет. и матем. физика. — 2009. — **158**, № 34. — С. 419—424.
- Труды Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (ТИИЭР). — 1989. — **77**, № 2. — 146 с.
- Шуман В. Н. Геосреда и сейсмический процесс: проблемы управления // Геофиз. журн. — 2011. — **33**, № 2. — С. 16—27.
- Шуман В. Н. Концепция динамически неустойчивой геосреды и сейсмоэлектромагнитный шум литосферы // Геофиз. журн. — 2010а. — **32**, № 6. — С. 101—118.
- Шуман В. Н. Магнитотеллурический импеданс: фундаментальные модели и возможности их обобщения // Геофиз. журн. — 2010б. — **32**, № 3. — С. 18—28.
- Шуман В. Н. Система локальных векторных тождеств импедансного типа для гармонического электромагнитного поля на замкнутой регулярной границе раздела и задачи геоэлектрики // Геофиз. журн. — 2008. — **30**, № 3. — С. 3—13.
- Шуман В. Н. Электродинамика фрактальных сред, переходное фрактальное рассеяние и электромагнитный шум литосферы // Геофиз. журн. — 2012а. — **34**, № 1. — С. 3—13.
- Шуман В. Н. Электромагнитная эмиссия литосферы: всегда ли мы адекватно трактуем то, о чем как будто знаем? // Геофиз. журн. — 2012б. — **34**, № 2. — С. 3—19.
- Шуман В. Н. Электромагнитная эмиссия литосферы: новые экспериментальные результаты и анализ проблемы // Геоинформатика. — 2010в. № 4. — С. 79—93.
- Шуман В. Н. Электромагнитно-акустические преобразования и высокоразрешающие зондирующие системы: новые возможности и новые формулировки старых вопросов // Геофиз. журн. — 2012в. — **34**, № 3. — С. 32—39.
- Шуман В. Н., Коболев В. П., Богданов Ю. А., Захаров И. Г., Яцюта Д. А. Спонтанное электромагнитное излучение на акваториях: новый эксперимент и приложения // Геофиз. журн. — 2011. — **33**, № 4. — С. 33—49.
- Шуман В. Н., Савин М. Г. Математические модели геоэлектрики. — Киев: Наук. думка, 2011. — 239 с.
- Constable Steven. Ten years of marine CSEM for hydrocarbon exploration // Geophysics. — 2010. — **75**, — P. 75A67—75A81.
- Edwards R. N. Marine controlled source electromagnetic: principles, methodologic, future, commercial application // Surveys in Geophysics. — 2005. — **26**, — P. 575—600.
- Semenov T. B., Shuman V. N. Impedance for induction soundings of the Earth's Mantle // Acta Geophysica. — 2010. — **58**, № 4. — P. 527—542.
- Senior T. B., Volakis A. Approximate boundary conditions in electromagnetics — London: IEE Press, 1995. — 353 p.
- Zhdanov M. S. Electromagnetic geophysics: Notes from the past and the road ahead, commercial application // Geophysics. — 2010. — **75**. — P. 75A49—75A66.