

Электромагнитно-акустические преобразования и высокоразрешающие зондирующие системы: новые возможности и новые формулировки старых вопросов

© В. Н. Шуман, 2012

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 14 февраля 2011 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

Наведено основні уявлення щодо структури нестационарного електромагнітного відгуку геосередовища та його "некласичні" прояви. Розглянуто явище прямого та оберненого електромагнітно-акустичного перетворення у шкір-шарі джерела електромагнітного поля, в результаті якого стає можливим не лише безконтактне збудження акустичних збурень у геосередовищі, а й безконтактне одержання інформації щодо його затухання та швидкості поширення. Проаналізовано можливості створення зондувальних систем високої роздільної здатності, які за формою є електромагнітними, а за структурою — акустичними.

The main ideas on the structure of non-stationary electromagnetic response of geo-medium and its "non-classical" manifestations have been considered. A phenomenon of direct and inverse electromagnetic-acoustic transformation in the skin-layer of the source of electromagnetic field is being examined, as a result of which not only noncontact excitation of acoustic disturbance in geo-medium becomes possible but also noncontact obtaining of information on its extinction rate and velocity of propagation. Possibilities of high-resolution sounding systems creation are analyzed, which are electromagnetic by their realization form and acoustic ones by their structure.

Введение. В настоящее время можно отметить три направления нестационарной геоэлектрики, в которых отмечается интенсивное развитие методов с контролируемым возбуждением поля, сопровождаемое интенсивным потоком публикаций (см., например, [Светов и др., 1996; Шуман, 1997, 2001, 2009; Небрат, Сочельников, 1998; Каменецкий, 1999; Черяука, Мартаков, 1999; Могилатов, 2002; Могилатов, Балашов, 2005; Шуман и др., 2008] и цитируемую там литературу). Первое из них связано с появившейся на рубеже 90-х годов прошлого века технологией регистрации электромагнитного отклика в очень раннем (сверхраннем) диапазоне времен, начиная с десятков наносекунд и шагом 2—5 нс, оказавшейся возможной благодаря современной измерительной технике. Второе ассоциируется с особенностями переходных характеристик, не

находящих объяснения в рамках классической электродинамики сплошных сред. Это относительно низкочастотные (0,2—0,5 Гц) и более высокочастотные осцилляции (5—2500 Гц). В качестве возможных механизмов их появления и "выхода" к точкам регистрации отклика на дневной поверхности обычно рассматривается два. Это — частотная дисперсия электромагнитных параметров геосреды и возможность появления высокочастотного "окна" (высокочастотного режима зондирования), теоретически обнаруженного в идеализированной материальной среде без дисперсии [Габийяр и др., 1972; Шуман, Причепий, 2004], в пределах которого не происходит сильное поглощение электромагнитных возмущений соответствующего спектрального состава. При этом наиболее часто для аппроксимации частотной зависимости используется модель

Cole-Cole [Уэйт, 1987; Светов и др., 1996; Каменецкий, 1999]. Третье — зондирование вертикальными токами — определяется сочетанием идеи использования нестационарного поля электрического типа с новым типом источника — круговым электрическим диполем [Могилатов, 2002; Могилатов, Балашов, 2005]. В этом методе решаются две взаимосвязанные задачи — устранение мощного динамического фона от вмещающей среды и реализация площадных работ с закрепленным источником.

Как известно, структура электромагнитного отклика, возбуждаемого локальным источником (магнитным или электрическим диполем, линией конечной длины) в нижнем проводящем полупространстве и на его поверхности формируется за счет двух типов возбуждения. Возбуждение первого рода по терминологии А. Золемерфельда и В. А. Фока распространяется от источника до пункта регистрации, не покидая проводящей среды. Возбуждение второго рода распространяется вдоль границы раздела “земля—воздух” и непрерывно ответвляется от нее в проводящую среду (латеральная или “боковая” волна [Кинг, Смит, 1984]). Напомним также, что переходной процесс допускает различные способы его аналитического представления. В частности, он может быть представлен либо в виде суперпозиции стационарных составляющих, либо в виде суммы интегралов, каждый из которых соответствует определенной сингулярности отклика [Mahmoud et al., 1979]. При этом глубина проникновения поля в проводящую среду является, по существу, единственным наиболее важным фактором, определяющим качественные динамические свойства отклика, описываемого уравнением диффузии.

Заметим, что задача теоретического описания ранних стадий процесса становления поля оказалась значительно сложнее ее аналога в квазистационарной (диффузионной) области, где квазистационарность предполагалась уже на стадии постановки соответствующей краевой задачи [Могилатов, 2002]. Очевидно, основная причина усложнений состоит в смене типа уравнений. Это означает, что численные расчеты в квазистационарном приближении (без учета токов смещения) реализуются относительно просто, а при их учете — сильно затруднены. В частности, расчет электромагнитного отклика, возбуждаемого сосредоточенным источником с током, меняющимся по закону импульса Хэвисайда, хотя, в прин-

ципе, и возможен, однако сильно осложнен тем обстоятельством, что в силу отмеченных выше условий фронты всей совокупности прямых, отраженных и рефрагированных волн имеют вырожденные носители и бесконечные амплитуды [Черяука, Мартаков, 1999]. В итоге, к сожалению, все еще нет аналитической теории, способной в деталях проанализировать процесс становления поля во всем возможном диапазоне времен, хотя имеющиеся теоретические наработки и позволяют в общих чертах представить себе процесс становления и возникающие ограничения.

Уместно также напомнить, что ни одно из используемых в настоящее время уравнений не дает исчерпывающего описания процесса распространения электромагнитных возмущений в реальной геосреде — диссипативной неравновесной многофазной системе. Измерение и эксперимент в такой среде, очевидно, не являются полностью формализованными операциями: особенности переходного процесса в геосреде не исчерпываются в рамках упомянутых подходов. Понятно также, что его исследование в расширенном временном интервале требует более углубленной электродинамической проработки [Шуман, 2009], включая конкретизацию базовой модели геосреды и средств ее описания. Разумеется, новые идеи и подходы вовсе не исключают и не заменяют стандартные постановки задачи с использованием классической базовой модели геосреды — слоистой одномерной структуры с кусочнопостоянным значением ее электромагнитных характеристик. В этом контексте важное методическое значение имеет предложенная в работах [Москвичев, 1989; Гололобов и др., 1995] электродинамическая модель взаимодействия электромагнитных возмущений с геологической средой, базирующаяся на существовании в ней свободных носителей зарядов (в частности, над залежами углеводородов) и их перемещением к дневной поверхности в присутствии постоянного магнитного поля земного ядра. Но такая электродинамическая система с плазменным компонентом, приобретающая благодаря наличию подмагничивающего поля H_0 анизотропные свойства, позволяет использовать для изучения ее взаимодействия с электромагнитным полем как кинематический, так и гидродинамический подходы [Пикельнер, 1966; Платман, Вольф, 1975; Виноградова и др., 1979; Бредов и др., 1985].

В работе [Шуман, 2009] предпринята попытка детализации некоторых из упомянутых

идей в описании такого взаимодействия, включая уточнение и конкретизацию базовой электродинамической модели, которые позволяют описать и понять некоторые экспериментальные ситуации, возникающие в условиях земной коры. Заметим, что явление скин-эффекта, составляющее фундаментальную основу электромагнитных зондирующих систем, может быть интерпретировано как отклик электронно-ионного "газа" в фоновой геосреде на внешнее переменное электромагнитное поле. Очевидно, что процесс распространения электромагнитных возмущений в такой среде происходит с конечной скоростью и характеризуется наличием резонансных частот [Гололобов и др., 1985; Шуман, 2009]. Коснемся теперь более детально этой стороны проблемы, выходя за рамки чисто электродинамического описания, опираясь на электромагнитно-акустические и акустоэлектромагнитные трансформации в среде и на границе раздела "земля—воздух" в присутствии подмагничивающего поля Земли \mathbf{H}_0 .

Электромагнитно-акустическое и акустоэлектромагнитное преобразование на границе проводника. Как известно, явление взаимной трансформации электромагнитных и упругих полей в материальной среде является на протяжении последних десятилетий предметом интенсивного экспериментального и теоретического изучения [Конторович, Глуцук, 1961; Кравченко, 1968; Васильев, Гайдуков, 1983; Каганов, Васильев, 1993]. Изучение этих процессов представляет собой самостоятельное и быстроразвивающееся направление физики твердого тела. В частности, установлено, что в широком диапазоне частот, магнитных полей и температур прослеживаются различные механизмы безконтактного преобразования электромагнитных и звуковых волн на границе металла, объединяемые общим понятием электромагнитно-акустического преобразования (ЭМАП). Согласно работе [Каганов, Васильев, 1993], суть ЭМАП состоит в том, что в среде, не обладающей ни пьезоэлектрическими, ни магнитоstrictionными свойствами, под действием падающей электромагнитной волны возбуждаются ультразвуковые волны той же или кратной частоты. При этом наличие границы раздела сред, как места сосредоточения источника возбуждения, имеет принципиальное значение.

Нетривиальность этого преобразования как физического явления определяется рядом обстоятельств. Во-первых, электромагнитная волна, падающая на границу раздела, возбуждает акустические колебания электрически нейтрального

тела. Во-вторых, число механизмов, обеспечивающих взаимное преобразование электромагнитных и акустических волн в металлах, велико. И, в-третьих, ряд эффектов, наблюдаемых при изучении чисто акустических свойств (затухания и скорости распространения ультразвука) проявляется иногда более отчетливо и выразительно в ЭМАП. Последнее обстоятельство существенно при разработке методов неразрушающего контроля [Комаров, 1986].

Как уже отмечалось, в широком диапазоне частот и магнитных полей наблюдаются различные механизмы безконтактного преобразования электромагнитных и звуковых волн на границе металла [Васильев, Гайдуков, 1983; Каганов, Васильев, 1993]. Тем не менее они могут быть рассмотрены в рамках единого подхода, основанного на анализе сил, действующих на кристаллическую решетку металла. Полная система уравнений, описывающая эти процессы, включает уравнения Максвелла, кинетическое уравнение для электронной функции распределения, уравнение упругости с учетом сил, действующих на решетку со стороны электронов, а также граничные условия на поверхности металла.

Плотность силы, действующей на кристаллическую решетку металла, в первом приближении можно представить в виде трех слагаемых [Каганов, Васильев, 1993]:

$$\mathbf{F} = \mathbf{f}_{\text{ST}} + \mathbf{f}_{\text{L}} + \mathbf{f}_{\text{Def}}. \quad (1)$$

Первое из них — сила Стюарта — Толмена:

$$\mathbf{f}_{\text{ST}} = \frac{m}{e} \frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t} = -\frac{i\omega m}{e} \mathbf{j}, \quad (2)$$

где m и l — масса и заряд электрона, ω — частота, \mathbf{j} — плотность тока.

Второе — сила Лоренца:

$$\mathbf{f}_{\text{L}} = [\mathbf{j} \times \mathbf{H}_0] / c, \quad (3)$$

где c — скорость света в вакууме, которая является лишь при наличии постоянного подмагничивающего поля \mathbf{H}_0 . Она зависит от соотношения глубины скин-слоя и длины упругой волны.

Третье — это плотность деформационной силы.

Роль различных компонент силы \mathbf{F} в процессах электромагнитно-акустического преобразования зависит от многих факторов и параметров задачи (частоты, магнитного поля \mathbf{H}_0 , температуры и др.)

Общей чертой стюарт-толменовского и лоренцова взаимодействий является то, что они оба выражаются через плотность переменного тока, возбуждаемого в скин-слое падающей на границу раздела электромагнитной волной.

Характеристиками ЭМАП обычно служат амплитуда возбуждаемого ультразвука и эффективность преобразования τ , определяемая отношением потоков энергии в упругой и электромагнитной волнах. Обычно величина τ находится в пределах 10^{-8} — 10^{-12} , причем наиболее интенсивная генерация происходит при постоянном магнитном поле \mathbf{H}_0 . При этом интенсивность ЭМАП за счет деформационного и стюарт-толменовского механизмов, как правило, существенно ниже эффективности ЭМАП в случае индукционного. Эти оценки при нормальном падении электромагнитной волны на поверхность металла в первом приближении могут быть получены из следующих простых соображений [Васильев, Гайдуков, 1983].

В случае возбуждения как продольного, так и поперечного звуков для плоских монохроматических волн уравнение вынужденных звуковых колебаний, распространяющихся от границы раздела, может быть записано в виде

$$\frac{\partial^2 \boldsymbol{\zeta}}{\partial t^2} - s^2 \frac{\partial^2 \boldsymbol{\zeta}}{\partial z^2} = \frac{1}{\rho c} [\mathbf{j} \times \mathbf{H}_0], \quad (4)$$

где $\boldsymbol{\zeta}$ — вектор смещения, s — скорость звука в металле, ρ — его плотность, c — скорость света.

Полагая далее, что электромагнитное поле изменяется пропорционально $\exp i(\omega t - kz)$, выпишем выражение для плотности переменного тока в скин-слое:

$$\mathbf{j}(z, t) = \frac{(1+i)c}{4\pi\delta} \mathbf{H} \exp\left[-(1+i)\frac{z}{\delta}\right] e^{i\omega t}, \quad (5)$$

где \mathbf{H} — амплитуда падающего переменного магнитного поля, $\delta = c \sqrt{2\pi\omega\sigma}$, σ — проводимость металла, ω — частота.

Подставим выражение (5) в волновое уравнение (4). На расстояниях, превышающих мощность скин-слоя, решение уравнения (4) примет вид [Васильев, Гайдуков, 1983]

$$|\zeta| = \frac{H_0 H}{4\pi\rho s\omega} \frac{1}{\sqrt{1+\beta^2}}, \quad (6)$$

где $\beta = q^2 \delta^2 / 2$, $q = 2\pi / \lambda$, λ — длина звуковой волны.

Соответственно, эффективность трансформации τ , определяемая как отношение потока звуковой энергии $\rho s \omega^2 \zeta^2 / 2$ к средней величине вектора Пойнтинга электромагнитной волны на поверхности металла $\omega \delta H^2 / 16\pi$, равна

$$r = \frac{H_0 H}{2\pi\rho s\omega\delta} \frac{1}{1+\beta^2}. \quad (7)$$

Однако экспериментально определяемая величина эффективности τ , как правило, существенно превышает теоретическую оценку (7).

ЭМАП и геосреда. Рассмотрим далее некоторые особенности прямого и обратного ЭМАП в ситуации, более соответствующей постановке возможного натурального эксперимента, когда электромагнитное поле возбуждается катушкой индуктивности или петлей, расположенными у границы раздела "земля—воздух", и этой же катушкой или петлей осуществляется регистрация электромагнитного отклика за счет обратного ЭМАП после выключения тока в источнике. В этом случае оказывается возможным не только безконтактное возбуждение звуковых волн в геосреде, но и безконтактное получение информации о скорости их распространения и структуре поля. В ней при этом, вследствие низкой скорости распространения, акустические волны обладают очень малыми длинами волн по сравнению с электромагнитными волнами той же частоты. В принципе, это позволяет существенно повысить разрешающую способность зондирующей системы, основанной на их регистрации. Очевидно, явление прямого и обратного электромагнитно-акустического преобразования может быть для этого весьма перспективным. Основное препятствие на пути реализации этой идеи — это низкая эффективность генерации ультразвука в геосреде и генерации ультразвуком электромагнитного сигнала.

Действительно, вследствие высокой отражательной способности проводника лишь небольшая доля энергии электромагнитной волны, падающей на его поверхность, диссипируется в нем в пределах скин-слоя и, естественно, еще меньшая часть превращается в энергию акустических колебаний и обратно — в энергию электромагнитного поля. Однако в некоторых частных случаях это взаимодействие полей становится достаточно сильным.

В частности установлено, что с точки зрения интенсивности возбуждаемого бесконтактным методом звукового поля наиболее выгодна генерация стоячих звуковых волн в горизонтально-слоистой структуре [Васильев, Гай-

дуков, 1983]. Здесь установление стоячих звуковых волн в слое сопровождается появлением резонансных особенностей на частотной зависимости поверхностного импеданса. Существенно, что сопутствующее стоячей звуковой волне электромагнитное поле столь же слабо, как и звуковое, затухающее в среде, может в условиях резонанса обладать заметной амплитудой [Кравченко, 1968].

Заметим, что в общем случае упругое поле содержит как компоненты, сосредоточенные в пределах скин-слоя, так и волну, бегущую от границы раздела со звуковой скоростью. При этом, если вектор \mathbf{H}_0 направлен вдоль граничной поверхности, генерируется продольный ультразвук, а в случае ориентации \mathbf{H}_0 по нормали к ней — поперечный.

Второе важное обстоятельство, влияющее на эффективность прямого и обратного ЭМАП — это специфические свойства и особенности геосреды, которые могут сильно изменить отмеченные соотношения основных механизмов ЭМАП, в частности стюарт-толменовского и лоренцова. Как известно, горные породы — это пористые образования, полностью или частично насыщенные раствором электролита. В такой среде заряд переносится преимущественно ионами, а не электронами. Однако, имея ввиду эффект Стюарта — Толмена, по мнению А. В. Гульельми, было бы ошибкой заменить массу электрона в формуле (2) на массу иона: при ускорении твердого скелета горной породы происходит кажущееся увеличение инертной массы носителей заряда [Гульельми, 2007, с. 1258]. Понятно, что присоединенная масса значительно превышает массу иона проводимости. Согласно выполненным А. В. Гульельми оценкам, присоединенная масса равна массе жидкости, заполняющей поры в объеме диска радиусом порядка среднего радиуса поры и толщиной порядка дебаевского радиуса. По этой причине величина коэффициента механомагнитной трансформации α в условиях земной коры больше, чем в механическом проводнике (в котором $\alpha = -m_e c / e$; m_e — масса электрона) примерно на восемь (!) порядков [Гульельми, 2007, с. 1258].

Это обстоятельство кардинально меняет существо дела, переводя эти трансформации в ряд измеримых (обнаруживаемых) существующими техническими средствами геоэлектрики.

ЭМАП и зондирующие системы. Итак, с точки зрения приложений можно сказать, что преобразователем электромагнитной и упругой энергий в ЭМАП выступает скин-слой про-

водника. Как уже отмечалось, глубина проникновения поля δ для однородного проводника определяется формулой

$$\delta(\omega) = \sqrt{2/\mu_0 \sigma \omega}.$$

Эквивалентное выражение во временной области имеет вид

$$\delta(t) = \sqrt{2t/\mu_0 \sigma},$$

где δ — глубина, на которой поле уменьшается в e раз по сравнению с его значением на поверхности проводника.

Очевидно, в каждый момент времени t после включения (выключения) источника информация о разрезе поступает не из всего нижнего полупространства, а из некоторого пласта, ограниченного мощностью скин-слоя $\delta(t)$, поскольку она определяет размер области, существенной для поля. Что касается скин-эффекта в слоистой среде, то он имеет довольно сложный характер. Понятие “мощность скин-слоя” в этом случае становится противоречивым, так как различные (электрические или магнитные) компоненты поля затухают в e раз быстрее или медленнее для каждого момента времени на разных глубинах [Бердичевский, Дмитриев, 1991]. Для произвольных трехмерных распределений удельной проводимости σ глубина проникновения, вообще говоря, определяет поверхность, которая при заданной частоте или времени становления и конкретном источнике возбуждения делит нижнее полупространство на области со значительной и незначительной (экспоненциально малой) напряженностью поля [Некут, Спир, 1989]. Простой способ сохранить удобное понятие “мощность скин-слоя” для неоднородной среды в заданный момент времени становления — это определить его как толщину скин-слоя в однородном полупространстве с проводимостью σ_t , равную кажущейся проводимости для этого момента времени [Исаев, Филатов, 1981].

Далее, формируя различные конфигурации электромагнитных полей у границы раздела “земля—воздух”, можно возбуждать в нижнем проводящем полупространстве не только объемные упругие волны, распространяющиеся под любым углом к ней, но и различные типы поверхностных акустических волн. В результате ЭМАП в пределах скин-слоя формируются интенсивные продольные колебания — звуковые стоячие волны, когда на толщине h геоэлектрического горизонта (слоя) укладыва-

ется целое число длин волн ультразвука λ , электромагнитное поле которых регистрируется тем же преобразователем. Отклик этого слабозатухающего в среде поля при пространственном резонансе $h = n\lambda / 2$, $n = 1, 2, \dots$, очевидно имеет немонотонный характер, т. е. особенности, всплески в переходном режиме или на соответствующих частотах в гармоническом. Напомним, что с понижением частоты мощность скин-слоя возрастает пропорционально $\omega^{-1/2}$, в то время как длина звуковой волны $\lambda \sim \omega^{-1}$.

Обратим внимание на важное обстоятельство — в неоднородных средах, вообще говоря, нет распространяющихся волн, они являются стоячими [Раутиан, 2008]. Колебания с длинами волн, кратных характерному размеру неоднородностей (к примеру, блоков или мощностей слоев), затухают значительно слабее волн, длина которых такова, что в них не могут возникнуть стоячие волны. В итоге слоистая среда с ростом скин-глубины ведет себя подобно набору резонаторов. Соответственно, резонансное прямое и обратное ЭМАП является источником возмущений электромагнитного отклика (в частности, на кривой становления на частотах стоячих волн), так как именно амплитуда рассматриваемого поля оказывается существенной в условиях резонанса.

Таким образом, основанная на этом принципе зондирующая система по форме реализации является электромагнитной, а по своей сущности — акустической. И эта передача энергии оказывается наиболее значимой в случае слоя, мощность которого меньше длины затухания звука в среде распространения. Высокая разрешающая способность такой возможной зондирующей системы основана на низкой скорости распространения акустических волн в геосреде, обладающими малыми длинами волн по сравнению с электромагнитными волнами той же частоты.

Как известно, разрешающая способность электромагнитных методов в квазистационарной области существенно ограничена гладким пространственным поведением диффузионных электромагнитных полей. Грубое эмпирическое правило для определения возможности выделения локального аномального объекта в геосреде: разрешимая аномалия должна иметь размеры, сравнимые с расстоянием от нее до точки, в которой измеряется поле [Некут, Спир, 1989, с. 66]. В противоположность этому при распространении волновых полей разрешимая аномалия должна иметь размеры того же порядка, что и длина волны в среде.

Заметим, что классический подход к объяснению особенностей процесса становления концентрируется исключительно в области электродинамики материальных сред. Актуальной в этой связи становится задача выделения тех из них, которые образуются за счет генерации электромагнитных возмущений звуком и в условиях резонанса могут стать доминирующими, т. е. обладать заметной амплитудой.

ЭМАП и полевой эксперимент. Очевидно, можно утверждать, что к настоящему времени накоплена необходимая теоретическая база для экспериментальных исследований по идентификации особенностей переходного процесса на фоне обычного диффузионного спада. В общих чертах ясен и механизм формирования акустического поля в скин-слое источника поля в геосреде как электромагнитно-динамического эффекта, а обратный процесс, т. е. генерация электромагнитных возмущений звуком, обуславливает возможность регистрации акустических колебаний. При этом как прямое, так и обратное ЭМАП имеет резонансный характер, причем на частотах резонанса возбуждаются звуковые стоячие волны, электромагнитное поле которых может регистрироваться тем же преобразователем — индуктивной катушкой. Важно, что с точки зрения интенсивности возбуждаемого таким образом звука наиболее выгодна и эффективна генерация стоячих звуковых волн в горизонтальнослоистой структуре. Созданной в слое звуковой волне сопутствует электромагнитное поле, характеризующееся звуковым законом дисперсии. Существенно, что амплитуда этого слабозатухающего в геосреде поля в условиях резонанса может оказаться заметной, доступной для регистрации существующими приборами. Задача теперь состоит в том, чтобы восстановить структуру этой части или компоненты электромагнитного отклика, которая формируется за счет генерации электромагнитных возмущений звуком в зависимости от формы, частоты, скважности, полярности и амплитуды импульса тока в источнике возбуждения электромагнитного поля.

Парадоксально, но такой эксперимент по восстановлению этой структуры отклика уже существует. В качестве частного примера очевидно можно сослаться на некоторые работы, в которых при визуализации разреза (среды распространения) используются скорости распространения процесса именно звукового диапазона. При этом регистрация пространственных и временных особенностей отклика, опре-

деление его тонкой структуры осуществляются либо путем подбора резонансной частоты генератора, либо с помощью длинных линий, расположенных на земной поверхности. В ряде случаев такой простейший способ диагностики разреза оказался достаточно эффективным, о чем свидетельствуют имеющиеся примеры [см. Шуман и др., 2008]. Тем не менее, его систематическое применение без должного понимания физической стороны проблемы, которая обычно оставалась "за кадром" и не обсуждалась в должной мере, оказалось уязвимым для критики со стороны многих профессионалов. И это понятно. Только четкая физическая картина процесса, его подробное математическое описание дают ключ к пониманию возможностей метода, его особенностей и ограничений.

Заключение. Оценивая в целом тенденции и пути развития исследований по теории и практике электромагнитных зондирующих систем, можно отметить, что к настоящему времени достигнуто достаточно полное понимание переходных процессов в геосреде в поле различных источников, механизмов формирования и доставки электромагнитного отклика к пунктам его регистрации, осцилляций на переходных характеристиках, опираясь на электродинамику сплошных сред. Но, как говорят физики, всегда ли мы верно понимаем то, что как будто бы знаем? Ведь всегда есть вероятность того, что мы не учли какого-либо существенного обстоятельства, меняющего сущность дела. И нередко именно здесь проявляется вся мощь, роль и значение эксперимента, который, вообще говоря, не является полностью формализованной операцией, так как касается реальности,

а не формализованной системы. Явление прямого и обратного электромагнитно-акустического преобразования — удачный пример такого свойства. ЭМАП открывает принципиально новые возможности создания зондирующих систем высокого разрешения. Отметим, что к настоящему времени эта проблема приобрела особую актуальность: многие их модификации значительно исчерпали свой ресурс и нуждаются в модернизации.

Актуален и другой аспект этой проблемы — создание методов нелинейной акустоэлектромагнитной диагностики геосреды, физической основой которых могут служить большие объемные нелинейности структурно-неоднородных многофазных сред.

Как известно, линейные методы позволяют исследовать объекты, изменяя частоту, фазу, поляризацию и направление распространения волны. Идеи, лежащие в основе нелинейных методов диагностики, основываются на зависимости отклика от амплитуды (интенсивности) возбуждающего импульса и его полярированности. При этом наличие механизмов, переносящих энергию колебаний в низкочастотную или высокочастотную области спектра, означает, что регистрируемый отклик, прошедший через реальную структурно-неоднородную среду, несет информацию о трассе своего распространения. Тем самым появляются "новое измерение" и новые возможности диагностики геосреды, создания зондирующих систем высокого разрешения. Разумеется, решение этих вопросов требует новых подходов как к измерительной технике, так и к теоретическому истолкованию результатов измерений.

Список литературы

- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-однородных сред. — Москва: Недра, 1991. — 250 с.
- Бредов М.М., Румянцев В.В., Топтыгин И.Н. Классическая электродинамика. — Москва: Наука, 1985. — 399 с.
- Васильев А.Н., Гайдуков Ю.П. Электромагнитное возбуждение звука в металлах // Успехи физ. наук. — 1983. — 141, вып. 3. — С. 431—467.
- Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. — Москва: Наука, 1979. — 383 с.
- Габийяр Р., Декон Г., Уэйт Дж.Р. Радиосвязь между подземными и подводными пунктами // Зарубеж. радиоэлектроника. — 1972. — № 12. — С. 16—34.
- 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. Ультранизкочастотные волны в коре и в магнитосфере Земли // Успехи физ. наук. — 2007. — 177, № 12. — С. 1257—1276.
- Исаев Г.А., Филатов В.В. О физико-математи-

- ческих принципах визуализации неустановившихся электромагнитных полей // Геология и геофизика. — 1981. — № 6. — С. 89—95.
- Каганов М.И., Васильев А.Н. Электромагнитно-акустическое преобразование — результат действия поверхностной силы // Успехи физ. наук. — 1993. — **163**, № 10. — С. 67—80.
- Каменецкий Ф.М. Высокорастворимая электроразведка: факт или реклама? // Геофизика. — 1999. — № 1. — С. 41—44.
- Кинг Р., Смит Г. Антенны в материальных средах (в 2-х кн.). — Москва: Мир, 1984. — 822 с.
- Комаров В.А. Электромагнитно-акустическое преобразование — метод неразрушающего контроля // Успехи физ. наук. — 1986. — **150**, вып. 1. — С. 164—166.
- Конторович В.М., Глуцок А.М. Преобразование звуковых и электромагнитных волн на границе проводника в магнитном поле // Журнал эксперимент. и теорет. физики. — 1961. — **41**, вып. 4 (10). — С. 1195—1204.
- Кравченко В.Я. Электромагнитное возбуждение звука в металлической пластине // Журнал эксперимент. и теорет. физики. — 1968. — **54**, вып. 5. — С. 1494—1509.
- Могилатов В.С. Импульсная электроразведка. — Новосибирск: Изд-во Новосибир. ун-та, 2002. — 208 с.
- Могилатов В.С., Балашов Б.П. Зондирование вертикальными токами. — Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал "Гео", 2005. — 207 с.
- Москвичев В. Н. Исследование взаимодействия электромагнитных волн с углеводородной залежью // Радиотехника и электроника. — Минск: Высш. шк., 1989. — Вып. 18. — С. 91—96.
- Небрат А.Г., Сочельников В.В. Электроразведка методом становления поля для поляризующихся сред // Геофизика. — 1998. — № 6. — С. 27—30.
- Некут А.Г., Слис Б.Р. Использование электромагнитных методов с контролируемым источником при разведке нефтяных месторождений // Тр. Ин-та инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (ТИИЭР). — 1989. — **77**, № 2. — С. 57—85.
- Пикельнер С.Б. Основы космической электродинамики. — Москва: Наука, 1966. — 407 с.
- Платман Ф., Вольф П. Волны и взаимодействие в плазме твердого тела. — Москва: Мир, 1975. — 438 с.
- Раутиан С.Г. Об отражении и преломлении на границе среды с отрицательной групповой скоростью // Успехи физ. наук. — 2008. — **178**, № 10. — С. 1017—1024.
- Светов Б.С., Агеев В.В., Лебедева Н.А. Поляризуемость горных пород и феномен высокорастворимой электроразведки // Геофизика. — 1996. — № 4. — С. 42—52.
- Уэйт Дж. Р. Геоэлектромагнетизм. — Москва: Недра, 1987. — 235 с.
- Черяука А.Б., Мартаков С.В. Численная имитация и анализ переходных электромагнитных процессов на ранних временах // Геология и геофизика. — 1999. — **40**, № 5. — С. 774—784.
- Шуман В.Н. Классические модели и идея "сверхразрешения" в теории электромагнитных зондирующих систем // Геофизика. — 1997. — № 6. — С. 8—14.
- Шуман В.Н. Переходные электромагнитные процессы в расширенном временном интервале: физико-математические модели и особенности // Геофиз. журн. — 2001. — **23**, № 1. — С. 3—21.
- Шуман В.Н. Переходные электромагнитные процессы на ранних временах в геологической среде с магнитоактивным плазменным компонентом // Геофиз. журн. — 2009. — **31**, № 3. — С. 32—40.
- Шуман В.Н., Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н. Радиоволновые зондирующие системы: элементы теории, состояние и перспективы // Геоинформатика. — 2008. — № 2. — С. 22—50.
- Шуман В.Н., Причепий Т.И. Оптимальные режимы электромагнитных зондирующих систем с контролируемым возбуждением поля в изотропных средах с дисперсией // Геофиз. журн. — 2004. — **26**, № 4. — С. 55—62.
- Mahmoud S.F., Botros A.Z., Wait J.R. Transient electromagnetic fields for a vertical magnetic dipole on two-layer Earth // Proc IEEE. — 1979. — **67**. — P. 1022—1029.