

ФИЗИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНДИРОВАНИЙ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ НАД СОЛЯНО-КУПОЛЬНЫМИ СТРУКТУРАМИ

Н.Ю. Бобров, С.С. Крылов, Е.Ю. Антонов*, А.Н. Шеин*, Н.П. Смилевец**

Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, Россия

* Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

** ООО «СК Геовизор», 129344, Москва, ул. Кольская, 2/6, Россия

Представлены результаты физического и математического моделирования, выполнявшегося для оценки потенциала электромагнитных зондирований становлением поля в районах развития соляно-купольной тектоники. Рассмотрены две электроразведочные системы: установка с индуктивным источником — горизонтальной петлей — и установка с источником смешанного типа — горизонтальной токовой линией. Показано, что метод становления поля может давать важную информацию об особенностях рельефа кровли соляных отложений.

Физическое моделирование, математическое моделирование, электромагнитные зондирования, метод становления поля, соляно-купольные структуры.

PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELING OF TRANSIENT ELECTROMAGNETIC SOUNDINGS OVER SALT-DOME STRUCTURES

N.Yu. Bobrov, S.S. Krylov, E.Yu. Antonov, A.N. Shein, and N.P. Smilevets

This paper presents the results of physical and mathematical modeling performed to evaluate the potential of transient electromagnetic sounding in areas of salt-dome tectonics. Two geoelectric arrays are considered: an array with an inductive source (a horizontal loop) and an array with a mixed-type source (a horizontal current line). It is shown that the transient electromagnetic method provides important information on the relief of the top of salt deposits.

Physical modeling, mathematical modeling, electromagnetic soundings, transient electromagnetic method, salt-dome structures

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитные зондирования с контролируемым источником являются важным инструментом геофизической разведки как в малоглубинных вариантах, так и при исследованиях верхней части земной коры. Современная электроразведка берется решать сложные двумерные и трехмерные задачи. Для обоснования различных технологий электромагнитных зондирований у исследователя имеется такой инструмент, как моделирование. Моделируя зондирования над геологическими структурами с известными физическими и геометрическими параметрами, можно выяснить преимущества и ограничения различных систем возбуждения и приема электромагнитного поля. Часто для ответа на вопрос о принципиальных возможностях той или иной установки достаточно использовать модели структур правильной геометрической формы.

Довольно долгое время единственным инструментом, позволяющим воспроизвести реальное электромагнитное зондирование при контролируемых параметрах трехмерной среды, являлось физическое моделирование. Начало работ по физическому моделированию электромагнитных зондирований можно отнести к концу 50-х годов XX столетия. Развитие техники физического моделирования происходило одновременно с развитием методов электроразведки. Постепенно сформировались два основных направления — баковое моделирование, при котором модели геологических структур помещаются в бассейн (бак), заполненный имитирующим проводящую фоновую среду раствором электролита, и моделирование на металлических моделях. Большой объем физического моделирования электромагнитных зондирований с дипольными источниками как в частотной, так и во временной области был выполнен А.Н. Кузнецовым [2002] в Наро-Фоминском филиале ВНИИГеофизики в 70—90-е годы XX в.

Результаты основных зарубежных работ по физическому моделированию обобщены в обзоре [Frischknecht, 1987]. Эти исследования позволили выявить важные закономерности работы различных электроразведочных систем.

Развитие в последние десятилетия программно-алгоритмических средств и возможностей вычислительной техники выдвинуло на первый план математическое моделирование [Wannamaker et al., 1984; Newman et al., 1986; Ward, Hohmann, 1988; Шурина, Эпов, 2006; Нечаев и др., 2009; Тригубович и др., 2009; Штабель и др., 2014]. Тем не менее аналоговое (физическое) моделирование продолжает применяться для верификации численных расчетов распространения электромагнитного поля в средах, контрастных по электрическим свойствам [Best et al., 1985; Farquharson et al., 2006; Ansari, Farquharson, 2014], а также для тестирования новых методов электроразведки [Pellerin, Labson, 1994; Macnae, Adams, 2011; Kolesnikov, Skorokhodov, 2014]. Можно сказать, что внедрение нового метода редко обходится без предшествующего физического моделирования, несмотря на существующие возможности численных расчетов. Так, в 2000-е годы на рынке морских электроразведочных работ утвердилась технология прямого поиска углеводородов при помощи дистанционного электромагнитного зондирования с донными станциями (SeaBed Logging), реализуемая норвежской компанией EMGS. Ее продвижению предшествовал, помимо всестороннего теоретического обоснования, подкрепленного результатами математических расчетов, модельный эксперимент в Научном центре компании Statoil в Трондхейме, где для этой цели был сооружен бассейн размером $9 \times 6 \times 8$ м [Løseth et al., 2008].

В данной работе изложены результаты физического и математического моделирования, выполнявшегося для оценки потенциала зондирования становлением поля в районах развития соляно-купольной тектоники. Физическое моделирование проводилось в Санкт-Петербургском государственном университете, математическое моделирование — в Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН в Новосибирске.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основным геофизическим методом при поисках углеводородов в настоящее время является сейсморазведка. Электроразведка выступает, как правило, в качестве вспомогательного метода, однако в определенных геологических условиях ее вклад в изучение геологического разреза может быть существенным. Так, в районах развития соляно-купольной тектоники сложной задачей для сейсмических методов является картирование первой отражающей границы (кровли соленосных отложений), от которой ведутся глубинные построения подсолевых границ. Эта трудность связана с тем, что неоднородные по своему составу соляные структуры и межкупольные мульды сложены породами с близкими скоростными характеристиками и в силу этого слабо различимы на временных сейсмических разрезах, что не позволяет их учесть при построении глубинных разрезов подсолевого комплекса отложений. Совершенно иначе данные структуры проявляются в электромагнитном поле. Существенная разница в значениях удельного электрического сопротивления (ρ) пород, слагающих соляные купола ($\rho = 200\text{—}20000$ Ом \times м), и надсолевых комплексов в мульдовых зонах ($\rho = 2\text{—}10$ Ом \times м) обуславливает их хорошую дифференциацию в интегральных геоэлектрических параметрах. Поэтому электроразведка в течение длительного времени успешно применялась для изучения геологических разрезов в районах распространения соляных структур, в частности, в Прикаспии. При этом наиболее часто в силу своей технологичности применяется метод зондирования становлением поля с использованием различных установок. В настоящее время наблюдается рост интереса нефтедобывающих компаний, занимающихся разведкой нефти в подсолевых отложениях, к оценке возможности картирования кровли соляных структур при помощи электроразведки. В рамках составления регламента полевых электроразведочных работ в подобных геологических условиях была поставлена задача исследования чувствительности различных электроразведочных систем к вариациям рельефа кровли соляных структур. Задача решалась комплексно при помощи математического и физического моделирования.

В качестве базовой выбрана модель однородной осадочной толщи мощностью 4 км с удельным электрическим сопротивлением 2 Ом \times м, залегающей на относительно плохопроводящем основании с удельным электрическим сопротивлением 100 Ом \times м (подобные параметры характерны для геоэлектрических разрезов Прикаспийской низменности). Моделировалось влияние на сигнал становления соляных структур различной геометрической формы и размеров (рис. 1), присутствующих в разрезе осадочной толщи. Удельное электрическое сопротивление соли полагалось равным 200 Ом \times м. При математическом моделировании в модель были также включены подсолевые отложения ($\rho = 50$ Ом \times м), однако их наличие практически не сказалось на результатах.

При исследованиях геологического разреза на глубину до нескольких километров требуются мощные источники поля, обладающие значительным моментом, геометрические размеры которых также достигают нескольких километров. Разворачивание таких систем в полевых условиях сопряжено с

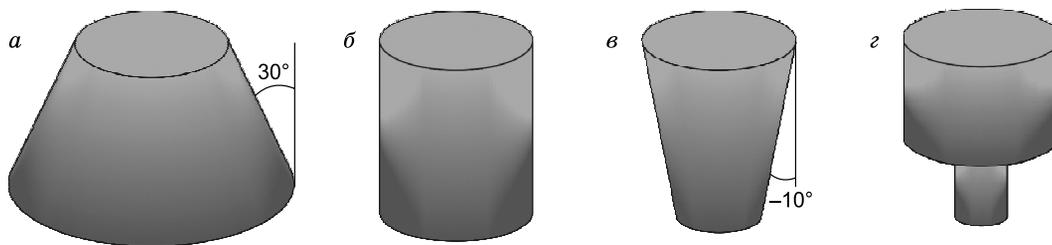


Рис. 1. Четыре типа моделируемых соляных структур:

a — усеченный конус (угол наклона боковой поверхности 30°); *б* — цилиндр; *в* — перевернутый усеченный конус (угол наклона боковой поверхности -10°); *г* — карниз.

большими трудозатратами, поэтому обычно применяются технологии зондирования, которые могут быть отнесены к категории «с закрепленным источником» — при одном положении источника поля измерения делаются во многих точках, обеспечивая требуемое покрытие исследуемой области; затем источник перемещается в другое положение и процесс повторяется. В данной работе рассмотрены две электроразведочные системы, нашедшие широкое применение при производственных работах: установка Qq-n с индуктивным источником — горизонтальной петлей [Угарова и др., 1977] — и установка ABMN-n с источником смешанного типа (кондуктивно-индуктивным) — горизонтальной токовой линией. Схемы установок приведены на рис. 2. При работах с установкой Qq-n измерения выполняются вдоль длинной оси генераторной петли, при помощи индукционных датчиков измеряется скорость изменения вертикальной компоненты магнитной индукции dB_z/dt . Размер моделируемой петли — 4000×1000 м, длина профиля внутри петли — 3000 м, шаг измерений — 100 м. После завершения цикла измерений внутри генераторной петли она перемещается параллельно своей длинной оси так, чтобы обеспечить, как минимум, 10 %-е перекрытие. Таким образом, осуществляется комбинирование режимов зондирования и профилирования. Первичные результаты измерений могут быть представлены в виде временных разрезов — наборов кривых значений сигнала становления, построенных вдоль профиля для фиксированных временных задержек.

Установка ABMN-n является гальваническим аналогом установки Qq-n. При перемещении вдоль токовой генераторной линии АВ при помощи пары электродов MN измеряется горизонтальная компонента электрического поля E_x . Длина моделируемой линии — 4000 м, рабочей области — 3000 м, приемного диполя — 250 м, расстояние от приемного диполя до генераторной линии (разнос) — 500 м, шаг измерений — 100 м.

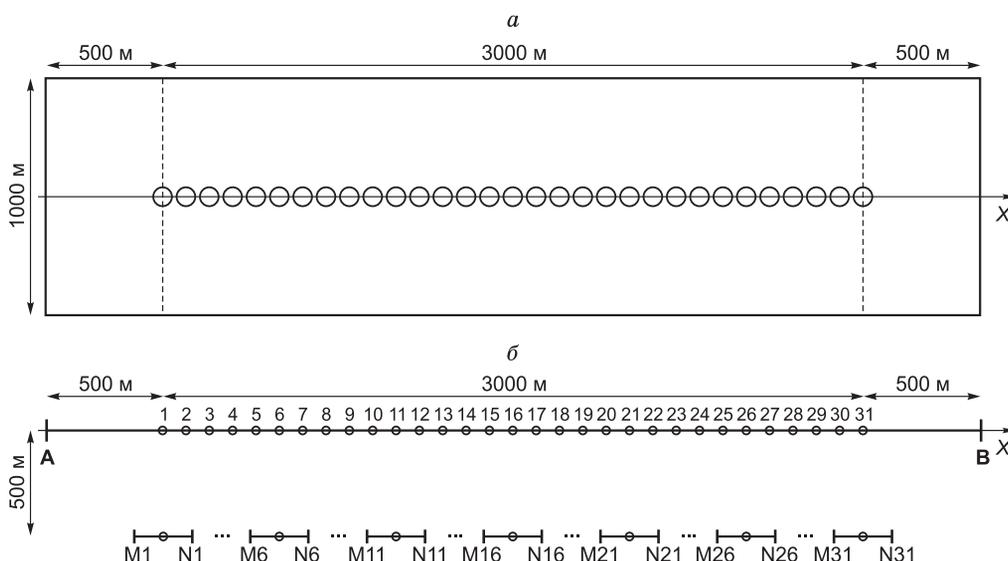


Рис. 2. Моделируемые электроразведочные установки:

a — Qq-n, *б* — ABMN-n.

МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Математическое моделирование переходных характеристик выполнялось с помощью программы Modem3D (авторы М.И. Иванов, И.А. Кремер, ИНГГ СО РАН [Иванов и др., 2007, 2009]). Программа предназначена для расчета импульсных электромагнитных полей в сложных трехмерных проводящих средах и реализована как интегрированная среда с полным набором графических функций для ввода данных, организации вычислительного процесса и анализа результатов расчетов. Задача моделирования устанавливаемого электромагнитного поля решается векторным методом конечных элементов на неструктурированной трехмерной тетраэдральной пространственной сетке. Интегрирование по времени осуществлялось с использованием неявной схемы Кранка—Николсона второго порядка точности.

Для повышения производительности программы Modem3D алгоритмы были распараллелены, что позволило эффективно использовать многоядерность современных процессоров. Распараллеливание применялось к векторно-матричным арифметическим операциям. Также для выполнения массовых расчетов была выполнена адаптация программы к работе в системе распределенных вычислений (GRID-система) и облачных средах, организованных в ИНГГ СО РАН [Мартыанов и др., 2011]. Тестирование на простых геометрических объектах и в случае горизонтально-слоистых сред показало, что для широкого класса моделей расчеты выполняются с высокой точностью [Шеин, 2013].

Программа Modem3D снабжена графическим редактором для построения трехмерных моделей расчетных областей, задания электромагнитных свойств материалов, описания источников полей. Генерация сеток метода конечных элементов осуществляется в автоматическом режиме и по результатам контроля качества сетки может быть отредактирована в ручном режиме. После построения пространственной сетки среды составляющим ее элементам (подобластям) могут быть назначены значения параметров удельного электрического сопротивления. Регулировать форму области можно с помощью разбиения тетраэдра по ребру и перемещения вершин тетраэдров (изменения их пространственных координат). Вводя мелкую сетку можно строить сложные объекты для моделирования. Также после создания модели предусмотрено задание граничных условий на внешней поверхности расчетной области. На рис. 3 приведены пространственные сеточные шаблоны трехмерных объектов — цилиндра и усеченного конуса с углом наклона боковой поверхности 30° .

Обязательная процедура, предваряющая расчеты, — тестирование, например, сравнением с программами, использующими другие алгоритмы расчета. В рамках данной работы выполнялось два вида тестирования программы Modem3D с использованием моделирования как одномерных, так и трехмерных геоэлектрических сред. Выполнено сопоставление расчетов с программами UnvQQ и TEM_Line (авторы Е.Ю. Антонов, М.И. Эпов, ИНГГ СО РАН) [Kozhevnikov, Antonov, 2006; Антонов, Шеин, 2008], которые позволяют моделировать импульсные переходные характеристики в горизонтально-слоистых проводящих средах, а также осуществлять проверку размеров расчетной области для задания граничных условий. Также были выполнены сравнительные расчеты с использованием других известных программ для моделирования электромагнитных полей в трехмерных средах: EFMAC (автор Н.В. Штабель, ИНГГ СО РАН) и GeoPrep (авторы М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, НГТУ, г. Новосибирск). Тестовые расчеты производились для объекта в виде усеченного конуса. Сравнение с программой EFMAC выполнялось в ИНГГ СО РАН, а с программой GeoPrep — в Сибирской геофизической научно-производственной компании (П.Ю. Легейдо). Сопоставление результатов вычислений в обоих случаях показало, что относительное отклонение переходных ЭДС не превышает 1 %.

На рис. 4 приводятся результаты сравнения сигналов, рассчитанных с помощью программ UnvQQ (рис. 4, а), TEM_Line (рис. 4, б) для горизонтально-слоистой среды с расчетами по программе Modem3D. Как видно из рисунка, совпадение переходных характеристик хорошее и на протяжении основного интервала времен (относительное отклонение расчетных ЭДС не превышает 1 %) за исключением самых поздних времен больших 4 с. Такое отличие возникает из-за общего понижения точности расчетов на

поздних временах становления, характерного для этих программ.

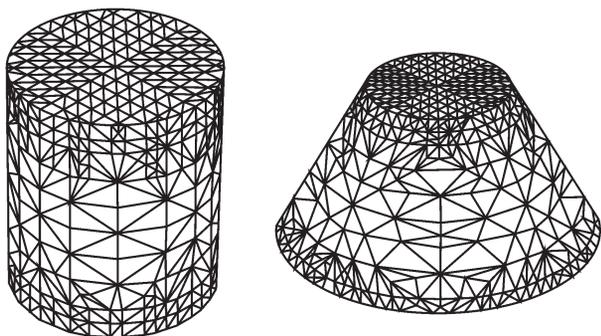


Рис. 3. Примеры построения неструктурированных тетраэдральных сеток для моделирования откликов от трехмерных объектов:

цилиндр и усеченный конус с углом наклона боковой поверхности 30° .

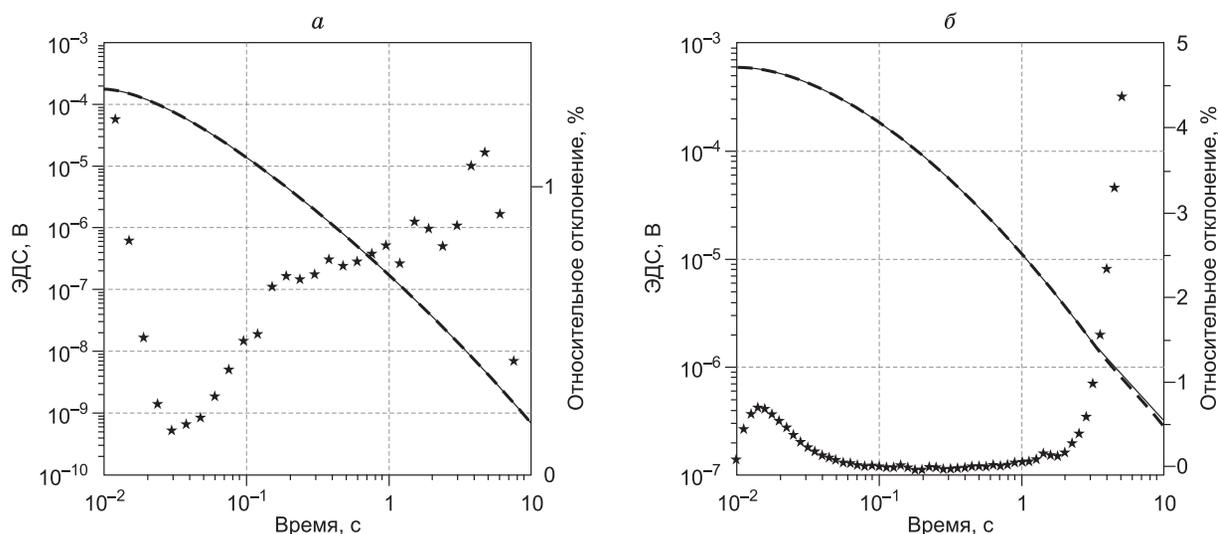


Рис. 4. Результаты тестовых расчетов ЭДС для горизонтально-слоистой модели с помощью программы Modem3D (сплошные линии) и программ:

a — UnvQQ (штриховая линия), установка Qq; *б* — TEM_Line (штриховая), установка АВМN. Звездочки — относительные отклонения переходных характеристик (%).

МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При физическом моделировании электромагнитных зондирований мы должны придерживаться критерия электромагнитного подобия, в соответствии с которым взаимные отношения геометрических параметров установки, среды и электромагнитного поля (длина волны в частотной области и параметр становления во временной области) должны сохраняться при переходе от природы к модели [Frischknecht, 1987; Бердичевский и др., 1987]. Для зондирований становлением поля (ЗС) критерий электромагнитного подобия принимает вид

$$t\rho/L^2 = \text{const}, \quad (1)$$

где t — время после выключения тока (время становления, задержка), ρ — удельное электрическое сопротивление среды, L — характерный размер. При соблюдении этого требования модельная и полевая кривые переходных процессов совпадают по форме, т. е. могут быть совмещены при изменении масштабов времени и амплитуды. Таким образом, уменьшение в лабораторных условиях всех геометрических размеров может быть скомпенсировано двумя способами — уменьшением времени становления и уменьшением удельного электрического сопротивления среды. Уменьшение размеров при моделировании определяется коэффициентом геометрического подобия $k = L_m/L_n$, где L_m — характерный размер модели, а L_n — характерный размер в натуре.

Физическое моделирование зондирований становлением поля проводилось с использованием серийной аппаратуры Цикл (производитель ООО «Цикл-Гео», г. Новосибирск). Зондирования с электрической линией моделировались в электролитическом баке размером 4.0×4.5 м, заполненном 20%-м раствором NaCl, представлявшим осадочный чехол. Удельное электрическое сопротивление рассола $\rho = 0.050 \pm 0.002$ Ом·м по результатам измерений электропроводности на постоянном токе.

Следует отметить, что реализация технологии АВМN-п в полевых условиях обусловлена, в первую очередь, стремлением к минимизации перемещений громоздкой генераторной линии. При модельных измерениях это не является проблемой, тогда как постоянство конфигурации установки, в том числе глубины погружения электродов и взаимного расположения проводов, повышает качество получаемого материала. В связи с этим было принято решение не воспроизводить при физическом моделировании измерения по технологии АВМN-п, а использовать стационарную экваториальную установку АВМN, которая при профилировании перемещается как единое целое. При профилировании по технологии АВМN-п изменение геометрии установки при приближении линии MN к токовым электродам существенно влияет на измеряемый сигнал, однако это влияние учитывается при обработке результатов реальных полевых измерений, когда усредняются данные, полученные при одинаковых координатах приемной линии, но при разных положениях генераторной линии. Данная процедура сглаживает

изменения сигнала, измеряемого в одной точке, связанные с различным положением токовых электродов относительно геоэлектрических неоднородностей. При измерениях с фиксированной геометрией установки нет необходимости в усреднении, в то же время величина аномального отклика и общая картина аномалии максимально близки к получаемым по технологии АВМN-п.

В модельных экспериментах измерительная установка размещалась на плотике из пеноплекса, что обеспечивало постоянство условий контакта электродов с электролитом. Плотик перемещался на упругом корде по поверхности электролита с возможностью жесткой фиксации в любой точке профиля с точностью порядка 1 мм. Токовые электроды изготавливались из латуни, измерения компоненты E_x осуществлялись по трехэлектродной схеме при помощи платиновых электродов ЭРП-102.

Коэффициент геометрического подобия установки составлял 1:10 000, т. е. осадочному слою с мощностью 4 км соответствовал слой электролита толщиной 40 см. В соответствии с (1) время становления в натуре (t_n) и на модели (t_m) для этой установки связаны между собой соотношением $t_m = 4 \cdot 10^{-7} t_n$. Применение специального генератора с малой длительностью выключения тока позволило уменьшить начальное время измерения переходного процесса до 0.2 мкс. Верхний предел диапазона измерения определялся временем спада сигнала становления до уровня поляризации электродов и был равен 7 мкс. Таким образом, на установке можно было регистрировать позднюю стадию становления, которой в натуре соответствовал интервал задержек 0.5—17.5 с. Рабочие характеристики аппаратуры для моделирования, построенной на базе серийной аппаратуры Цикл, близки к достигнутым в специализированной установке, разработывавшейся ранее в Наро-Фоминском филиале ВНИИГ геофизики [Дешица, Кузнецов, 1981].

Модели соляных структур для бакового моделирования изготавливались из цементно-песчаной смеси и керамзита. По своим электрическим свойствам получаемые модели, как и дно бака, являются изоляторами. Однако поскольку в натуре контраст по электропроводности пород основания и соляных структур с осадочной толщей составляет полтора-два порядка, использование непроводящих моделей при физическом моделировании вполне оправданно.

Измерениям над моделями предшествовало получение карты бака, что позволило оценить влияние его конечных размеров на результаты измерений на разных временных задержках.

Как показывают оценки, выполнить баковое моделирование зондирований с индуктивным источником со стандартной аппаратурой практически невозможно. В поздней стадии сигнал установки Qq над проводящим пластом, который в этом случае может быть аппроксимирован S-плоскостью, спадает по закону t^{-4} и быстро достигает шумового порога. Для поднятия уровня сигнала обычно увеличивают число витков в приемной и генераторной рамках, однако это приводит к увеличению влияния межвитковой емкости и возрастанию вклада собственного переходного колебательного процесса, который искажает полезный сигнал. Другой путь — сдвиг рабочего диапазона в область больших времен посредством увеличения масштаба модели L_m , однако существенное увеличение коэффициента k таким образом невозможно. Альтернативой баковым измерениям при моделировании ЗС с установкой Qq является использование металлических моделей. Низкое удельное электрическое сопротивление металлов позволяет сдвинуть интервал измерения в область больших времен на два-три порядка и таким образом разнести рабочий диапазон и интервал максимального проявления собственных переходных процессов в рабочих контурах.

Металлические модели для физического моделирования ЗС с индуктивным источником изготавливались методом литья в песчаные формы. В качестве материала моделей был выбран литейный алюминиевый сплав АК-7, моделирующий породы осадочной толщи. Коэффициент геометрического подобия в этом случае был равен 1:100 000, т. е. 1 см на модели соответствовал 1 км в натуре. Модели представляли собой плиты размером $40 \times 30 \times 4$ см. Удельное электрическое сопротивление алюминиевого сплава $\rho = (7.4 \pm 0.3) \times 10^{-8}$ Ом·м по результатам оценки продольной проводимости плиты. Выемки, имитирующие соляные структуры, представленные на рис. 1, в, з, создавались в центре моделей при помощи вставок соответствующей конфигурации, добавляемых в форму при отливке. Выемки с углами наклона 0° (цилиндр) и 30° создавались после завершения измерений на моделях с углом -10° посредством дополнительной выборки металла фрезерованием.

Рабочий диапазон измерения сигналов становления на металлических моделях составлял 20 мкс—20 мс. Поскольку в этом случае времени измерения на модели и в натуре связаны соотношением $t_m = 2.7 \cdot 10^{-3} t_n$, соответствующий интервал при полевых измерениях составляет 7.4 мс—7.4 с.

Измерения проводились при помощи многовитковых рамок, имитирующих прямоугольную генераторную петлю размером 4000×1000 м и приемный индукционный датчик, перемещаемый вдоль длинной оси генераторной петли. Для точного позиционирования рамок была изготовлена специальная система крепежа, позволяющая разместить приемную и генераторную рамки в любой точке на поверхности плиты с точностью порядка 0.1 мм, выполняя измерения в режиме профилирования. Специальные исследования влияния размеров рамок и толщины обмоток на измеряемый сигнал становления по-

казали, что этими факторами можно пренебречь при временах становления больших 1.3 мс, что соответствует 0.5 с при реальных измерениях.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На первом этапе работы проводилось математическое и физическое моделирование ЗС с использованием моделей одиночных соляных структур (см. рис. 1), залегающих на различной глубине, для оценки чувствительности двух электроразведочных установок к изменениям размеров и формы этих образований. Мощность осадочной толщи оставалась постоянной, равной 4 км. Результаты представлялись в виде временных разрезов нормированного аномального поля δU , определяемого как $(U - U_0)/U_0$, где U — сигнал становления в присутствии аномального объекта, а U_0 — сигнал становления над однородной осадочной толщей. Пространственный масштаб на графиках для физического и математического моделирования один, и он соответствует натурным измерениям.

На рис. 5 представлены временные разрезы δU для установки Qq-n над усеченным конусом с углом наклона боковой поверхности 30° . Глубина залегания верхней кромки объекта 500 м, высота конуса 3500 м, диаметр верхнего основания 3000 м. На рис. 5, а приведен временной разрез по результатам физического моделирования, на рис. 5, б — по результатам математического моделирования. Профиль проходил над центром конуса. Изолинии аномального поля, полученные при разных положениях генераторной петли, показаны разным цветом. Рабочая область при физическом моделировании была немного меньше 3000 м из-за конечных размеров приемной рамки.

На ранних временах аномалия имеет знак «плюс», на поздних — «минус». Максимум аномального поля наблюдается на поздних временах над краем верхней поверхности усеченного конуса (1500 м от его центра), при этом величина аномалии достигает 40 %. При удалении от соляного купола аномальное поле уменьшается.

На рис. 6 приведены результаты физического и математического моделирования зондирований становлением поля над тем же аномальным объектом установкой со смешанным возбуждением. Отдельные изолинии аномального поля по результатам математического моделирования установки АВМN-n на рисунке не показаны, временные разрезы δU для разных положений генераторной петли представлены тоновой закрашкой разного цвета в интервале между изолиниями, соответствующими максимуму и минимуму аномального поля. На том же рисунке приведены изолинии δU , полученные по результатам физического моделирования для разных временных задержек. Баксовые измерения, в отличие от численных расчетов, проводились с фиксированной геометрией установки (экваториальная установка АВМN), поэтому для каждой задержки получена одна непрерывная изолиния. Максимальное удаление установки от центра купола при физическом моделировании было увеличено до 10 000 м. Видно, что на поздних временах даже на таком расстоянии влияние аномального объекта остается заметным. Величина аномалии максимальна над центром соляного купола и составляет 130 % по результатам математического моделирования и 170 % по данным физического моделирования. Очевидно, что установка со смешанным возбуждением значительно сильнее реагирует на присутствие плохопроводящего объекта, чем индуктивная установка, поскольку в поле горизонтального электрического диполя, помимо ТЕ моды, присутствует также ТМ мода, которой нет в поле горизонтальной петли.

На втором этапе работы выполнялось моделирование профильных зондирований становлением поля над моделями «соляных гряд» — структур, состоящих из нескольких объектов простой формы, для выяснения их взаимного влияния при возбуждении электромагнитным полем. На рис. 7 приведены временные разрезы нормированного аномального поля над моделью Гряда 1, состоящей из соляных структур четырех типов, представленных на рис. 1. Высота всех объектов 3500 м, глубина залегания 500 м, диаметр верхнего основания 3000 м. Математическое моделирование выполнялось для установки АВМN-n, когда генераторная линия последовательно, с некоторым перекрытием, перемещается вдоль профиля, физическое моделирование — для непрерывного профилирования с экваториальной установкой АВМN.

Моделирование показало, что величина аномалии от непроводящего объекта, имитирующего соляной купол, зависит от глубины до верхней кромки объекта (уменьшается с погружением объекта), а также в первом приближении определяется площадью сечения объекта вертикальной плоскостью, проходящей через его центр. Максимальная аномалия наблюдается над моделью 1. Таким образом, физическое моделирование показало высокую информативность электроразведки при исследованиях соляных структур с положительными углами наклона стенок.

В целом присутствие в разрезе непроводящего тела приводит к увеличению сигнала становления при расположении установки над центром этого тела и к уменьшению сигнала в непосредственной близости от непроводящего объекта. Оба эффекта вызваны перестройкой картины индукционных токов в окрестностях соляного купола. Первый эффект связан с увеличением плотности токовых линий над

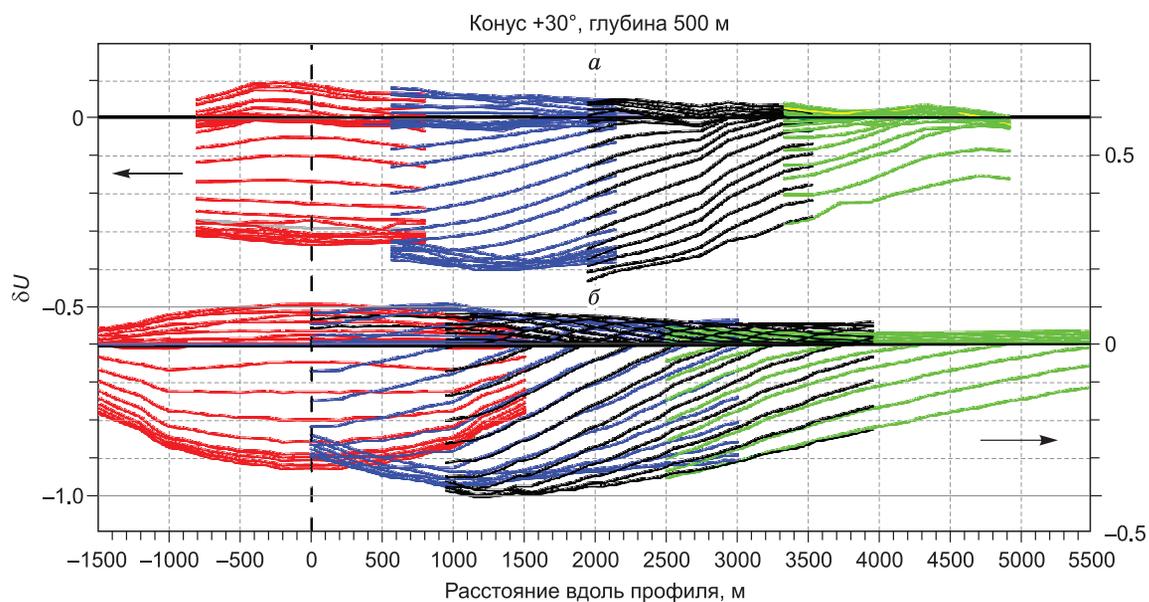


Рис. 5. Временные разрезы δU для установки Qq-п над конусом с углом наклона боковой поверхности 30° по результатам:

a — физического моделирования; *b* — математического моделирования. Диапазон задержек 7.4 мс—3.7 с.

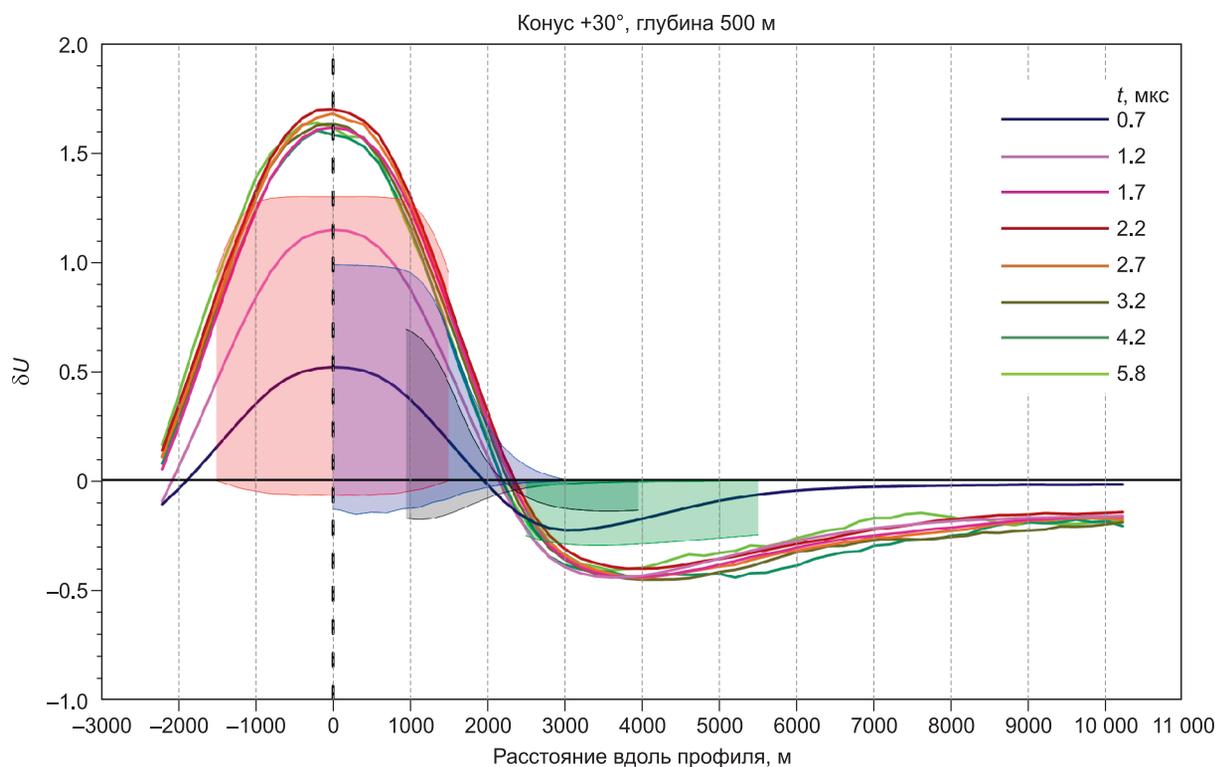


Рис. 6. Временные разрезы δU для установки со смешанным возбуждением над конусом с углом наклона боковой поверхности 30°.

Тоновая раскраска — по результатам математического моделирования поля установки АВМN-п для разных положений генераторной линии (диапазон задержек 1 мс—10 с). Изолинии — по результатам физического моделирования поля экваториальной установки АВМN (диапазон задержек 0.7—5.8 мкс; в натуре соответствует интервалу 1.75—14.5 с).

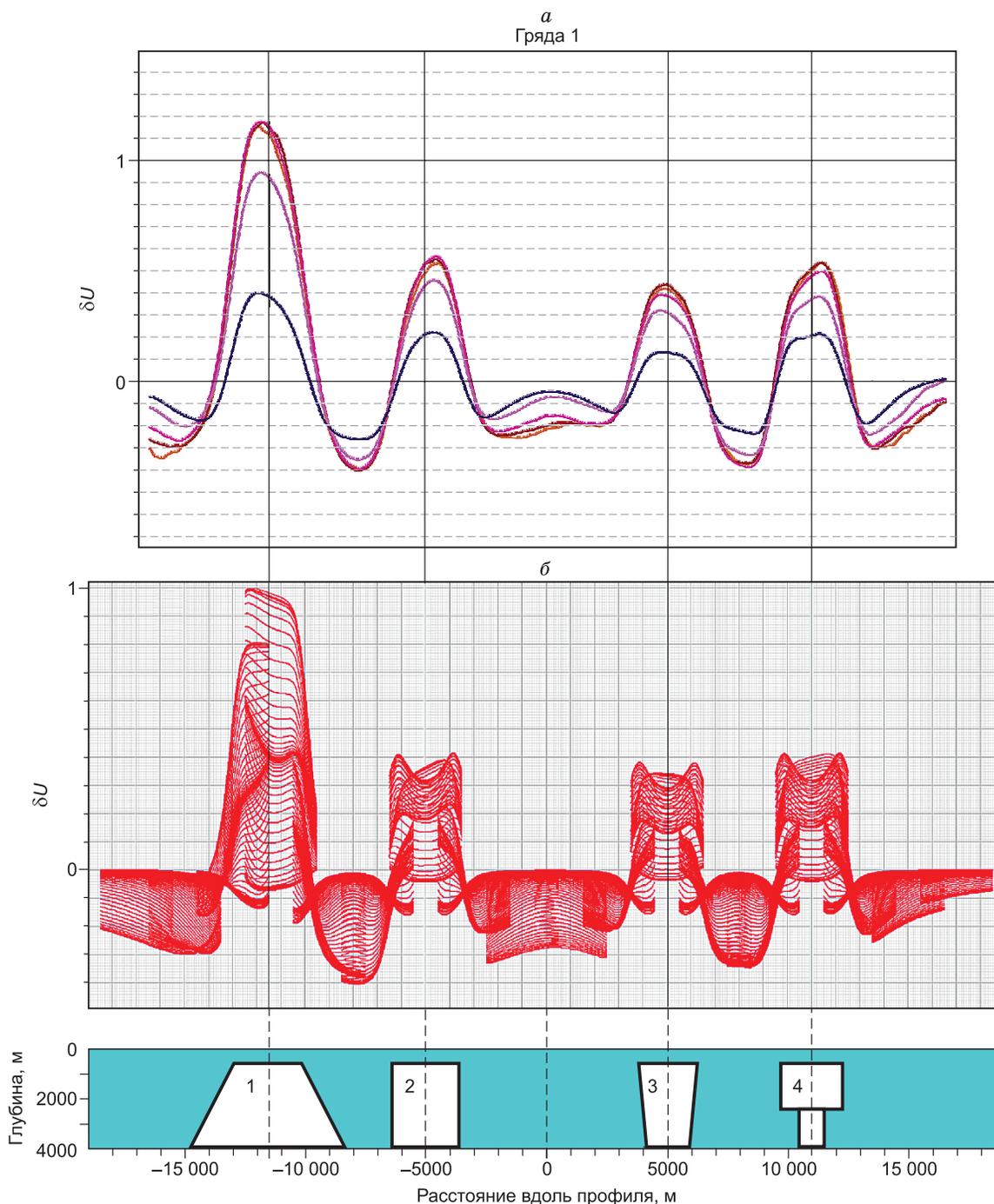


Рис. 7. Временные разрезы δU для установки со смешанным возбуждением над моделью Гряда 1 по результатам:

a — физического моделирования поля экваториальной установки АВМН (диапазон задержек 0.7–2.7 мкс; в натуре соответствует интервалу 1.75–6.75 с); *b* — математического моделирования поля установки АВМН-п (диапазон задержек 1 мс–10 с). 1–4 — типы соляных структур.

верхней кромкой объекта, второй — с их вытеснением из области высокого удельного электрического сопротивления. Также заметно уменьшение величины аномального сигнала над объектом со стороны другого близко расположенного непроводящего объекта, из-за чего аномалии становятся несимметричными. В частности, при рассмотрении изолиний аномального сигнала над моделями 3 и 4 заметно, что, несмотря на одинаковый поперечный размер объектов, они в разной степени влияют на картину аномального поля друг друга. Это происходит потому, что в картине изолиний нормированного аномаль-

ного поля глубина отрицательных «крыльев» аномалии от модели 4 больше, чем от модели 3. Этот эффект проявляется на поздних временах, когда поле распространяется на большую глубину, что свидетельствует о том, что и в случае отрицательных углов наклона стенок соляных структур сигнал становления электрической линии несет информацию о геометрии их нижней части, и эти данные могут использоваться для уточнения данных сейсморазведки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное математическое и физическое моделирование нестационарных полей двух установок (с индуктивным и смешанным возбуждением) показало, что установка AMNB-n более эффективна для определения формы и размера соляных структур, чем установка Qq-n. Геоэлектрическая обстановка Прикаспийской низменности благоприятна для применения электроразведки методом становления поля, который может быть важным дополнением сейсмических методов при картировании рельефа кровли соляных отложений. При этом даже относительно сложные вариации геологического строения соляной толщи (отрицательные углы наклона стенок соляных куполов, карнизы) находят отражение в регистрируемом сигнале, однако необходима разработка специальной методики для их выделения.

Исследования показали, что серийная аппаратура Цикл может с успехом использоваться для физического моделирования зондирований становлением поля. Учитывая возможность создания достаточно сложных аналоговых моделей геологических структур, потенциал физического моделирования при решении методических задач электроразведки остается высоким.

Авторы благодарны ООО «Геологический центр СПбГУ» и ООО «СК Геовизор» за разрешение опубликовать результаты исследований, а также М.И. Иванову, И.А. Кремеру (ИНГГ СО РАН) и В.А. Катешову (ЗАО «Центр РИТМ») за предоставленную возможность использовать программный комплекс Modem3D.

ЛИТЕРАТУРА

Антонов Е.Ю., Шейн А.Н. Способы повышения качества инверсии данных нестационарных электромагнитных зондирований при изучении поляризующихся сред // Геология и геофизика, 2008, т. 49, № 10, с. 1046—1062.

Бердичевский М.Н., Мороз И.П., Кобзова В.М., Билинский А.И. Физическое моделирование в геоэлектрике. Киев, Наук. думка, 1987, 140 с.

Дешица А.С., Кузнецов А.Н. Установка для физического моделирования задач методом становления электромагнитного поля // Прикладная геофизика, 1981, вып. 101, с. 134—139.

Иванов М.И., Катешов В.А., Кремер И.А., Урев М.В. Решение трехмерных нестационарных задач импульсной электроразведки // Автометрия, 2007, т. 43, № 2, с. 33.

Иванов М.И., Катешов В.А., Кремер И.А., Эпов М.И. Программное обеспечение Modem 3D для интерпретации данных нестационарных зондирований с учетом эффектов вызванной поляризации // Записки Горного института, 2009, т. 183, с. 242—245.

Кузнецов А.Н. Физическое моделирование электромагнитных полей с целью сравнения эффективности электроразведочных методов // Геофизика, 2002, № 6, с. 37—47.

Мартьянов А.С., Тейтельбаум Д.В., Сердюк К.С., Власов А.А., Ельцов И.Н. Использование свободных сетевых ресурсов предприятия для решения емких вычислительных геофизических задач // Каротажник, 2011, № 11(209), с. 56—64.

Нечаев О.В., Шурина Э.П., Эпов М.И. Трехмерное численное моделирование электромагнитных полей // Геофизический журнал, 2009, т. 31, № 4, с. 158—163.

Тригубович Г.М., Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г. 3D-электроразведка становлением поля. Новосибирск, Наука, 2009, 218 с.

Угарова Н.П., Глечиков В.А., Попов А.И. Применение детализационной установки ЗСТ-n при решении геологических задач в условиях соляной тектоники // Геология народного хозяйства, 1977, с. 112—118.

Шейн А.Н. Особенности программы для расчета нестационарных электромагнитных полей в трехмерных средах Modem3D // Материалы Всероссийской научной конференции. Т. 2. Старый Оскол, Старооскольский филиал ФГБОУ ВПО МГРИ-РГГРУ/ИПК «Кирилица», 2013, с. 99—104.

Штабель Н.В., Эпов М.И., Антонов Е.Ю., Корсаков М.А. Аппроксимация субвертикальной границы в задачах импульсных электромагнитных зондирований // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (1), с. 108—118.

Шурина Э.П., Эпов М.И. Математические модели и вычислительные схемы для задач геоэлектрики // Тезисы докладов межд. конф. «Тихонов и современная математика» (Москва, 19—25 июня 2006 г.). М., Изд-во Моск. ун-та ВМиК, 2006, с. 59.

Ansari S., Farquharson C.G. 3D finite-element forward modeling of electromagnetic data using vector and scalar potentials and unstructured grids // *Geophysics*, 2014, v. 79, № 4, p. E149—E165.

Best M.E., Duncan P., Jacobs F.J., Scheen W.L. Numerical modeling of the electromagnetic response of three-dimensional conductors in a layered earth // *Geophysics*, 1985, v. 50, № 4, p. 665—676.

Farquharson C.G., Duckworth K., Oldenburg D.W. Comparison of integral equation and physical scale modeling of the electromagnetic responses of models with large conductivity contrasts // *Geophysics*, 2006, v. 71, № 4, p. G169—G177.

Frischknecht F.C. Electromagnetic physical scale modeling // *Electromagnetic methods in applied geophysics* / Ed. M.N. Nabighian. 1987, v. 1, p. 365—441.

Kolesnikov V.E., Skorokhodov A.A. Two-dimensional investigation of the Earth crust subsurface layer by method of internal sliding contact // *Proceedings of the 10th Intl. Conf. «Problems of Geocosmos»* (Oct. 6—10, 2014, St. Petersburg, Russia). 2014, p. 23—28.

Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y. Fast-decaying IP in frozen unconsolidated rocks and potentialities for its use in permafrost-related TEM studies // *Geophys. Prosp.*, 2006, № 54, p. 383—397.

Løseth L.O., Pedersen H.M., Schaug-Pettersen T., Ellingsrud S., Eidesmo T. A scaled experiment for the verification of the SeaBed Logging method // *J. Appl. Geophys.*, 2008, v. 64, p. 47—55.

Macnae J., Adams C. Near-surface resistivity contrast mapping with a capacitive sensor array and an inductive source // *Geophysics*, 2011, № 2, p. G13—G23.

Newman G.A., Hohmann G.W., Anderson W.L. Transient electromagnetic response of a three-dimensional body in a layered Earth // *Geophysics*, 1986, v. 51, p. 1608—1627.

Pellerin L., Labson V.F. VETEM — a Very Early Time Electromagnetic System // *Proceedings of the Symposium on the application to engineering and environmental problems, SAGEEP94*, 1994, p. 795—802.

Wannamaker P.E., Hohmann G.W., San Filippo W.A. Electromagnetic modeling of three-dimensional bodies in layered earths using integral equations // *Geophys. Soc. Expl. Geophys.*, 1984, v. 49, p. 60—74.

Ward S.H., Hohmann G.W. Electromagnetic theory for geophysical applications // *Electromagnetic methods in applied geophysics* / Ed. M.N. Nabighian. 1987, v. 1, p. 131—250.

*Рекомендована к печати 16 марта 2016 г.
А.Д. Дучковым*

*Поступила в редакцию 4 сентября 2015 г.,
после доработки — 25 февраля 2016 г.*