

СОДЕРЖАНИЕ

Р.Г. Анисимов, Р.Т. Давлетханов Некоторые технологические приемы, используемые при построении пластовой глубинно-скоростной модели среды	2
Л.А. Барышев, В.А. Ващенко Петрофизическая модель осинского горизонта и прогноз карбонатных коллекторов на Непском своде	8
А.И. Кобрунов, А.Н. Дорогобед, П.В. Кожевникова Элементы информационной экспертизы результатов геологического моделирования в нефтегазовой геологии	16
К.М. Кузнецов, И.В. Лыгин, А.А. Булычев Алгоритм численного решения прямой задачи гравиметрии от сферического слоя переменной плотности	22
Ю.В. Антонов Всплески неприливных вариаций силы тяжести	28
А.Д. Каринский, Д.С. Даев Влияние локальных объектов на результаты электроразведки методом сопротивлений; опыт математического моделирования	35
В.С. Могилатов, А.В. Злобинский Универсальное математическое обеспечение зондирования становлением	45
В.В. Носкевич, Н.В. Федорова, В.В. Ткачев, Д.А. Байтлеу, А.М. Юминов Реконструкция древних медных карьеров бронзового века по георадарным данным	56
Н.Е. Фоменко, Э.Г. Порфилкин, Д.А. Гапонов Исследование геологической среды методом электропотенциального томографического зондирования с целью выбора мест безопасного размещения промышленных и бытовых отходов	63

ДИСКУССИИ, ОБСУЖДЕНИЯ

Ч.С. Алиев, А.А. Фейзуллаев, Р.Дж. Багирли, Ф.Ф. Махмудова Закономерности распределения радона в Азербайджане и контролирующие их факторы	72
С.В. Горбачев Классификация систем наблюдений 3D по азимутальному признаку	78

CONTENTS

R.G. Anisimov, R.T. Davletkhanov Some technological methods used for layer-based velocity-depth model building	2
L.A. Baryshev, V.A. Vashenko Petrophysical model of the osinsky horizon and the forecast carbonate reservoirs in the nepsky arch	8
A.I. Kobrunov, A.N. Dorogobed, P.V. Kozhevnikova Elements of the information expertise results of the geological modeling in petroleum geology	16
K.M. Kuznetsov, I.V. Lygin, A.A. Bulychov Algorithm of numeric direct gravity calculation of spherical layer with variable density	22
Yu.V. Antonov Bursts of non-tidal variations of gravity	28
A.D. Karinskiy, D.S. Daev Influence of local objects on the resistivity method results; experience of mathematical modeling	35
V.S. Mogilatov, A.V. Zlobinskiy Universal software for electrical prospecting by transient	45
V.V. Noskevich, N.V. Fedorova, V.V. Tkachev, D.A. Baitleu, A.M. Juminov Reconstruction of ancient quarries copper bronze age by gpr data	56
N.E. Fomenko, E.G. Porfilkin, D.A. Gaponov The study of the geological environment by means of electropotential tomographic zounding with the purpose of selecting sites for secure placement of industrial and domestic waste	63

Ch.S. Aliyev, A.A. Feyzullayev, R.J. Baghirli, F.F. Mahmudova Regularities of radon distribution on the territory of Azerbaijan and controlling factors	72
S.V. Gorbachev Azimuth-based classification of 3D surveying systems	78

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР: А.А. НИКИТИН

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛ. РЕДАКТОРА: Л.А. Золотая, А.В. Белоусов

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: В.Ю. Абрамов, И.А. Безрук, Ю.И. Блох, М.Л. Владов, Е.А. Давыдова,
М.С. Денисов, Г.М. Золоева, С.А. Кириллов, А.С. Лаврик, И.Н. Модин, И.А. Мушин, В.И. Петерсилье,
Е.Е. Поляков, С.Н. Птецов, В.И. Рыжков, Р.Б. Сержантов, В.П. Цирульников, Р.А. Шакиров, В.А. Шевнин

ОТВЕТСТВЕННЫЙ ЗА ВЫПУСК: доктор технических наук, профессор В.И. Рыжков

РЕДАКЦИОННО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ЕАГО:

115191, г. Москва, ул. 2-я Рошинская, д. 10
Тел. (495) 952-47-15, тел./факс (495) 952-44-79
E-mail: journal@eago.ru
www.moeeago.ru
Свидетельство о регистрации журнала №0110923 от 21.07.93 г.
ISSN 1681-4568

ООО «ИЗДАТЕЛЬСТВО «ПОЛИПРЕСС»:

Е.Н. Васильева – компьютерная верстка
И.Г. Чижилова – корректура
170026, г. Тверь, Комсомольский пр-т, д. 7
Тел./факс (4822) 55-16-76
E-mail: polypress@yandex.ru; www.poly-press.ru
Отпечатано в ООО «Издательство «Полипресс»
Тираж 950 экз. Заказ №6236

Ответственность за подбор и изложение фактов в статьях несут авторы. Редакция может публиковать статьи, не разделяя точки зрения авторов.

УДК 550.837

УНИВЕРСАЛЬНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗОНДИРОВАНИЙ СТАНОВЛЕНИЕМ

В.С. Могилатов¹, А.В. Злобинский²

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3; Новосибирский государственный университет. 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: mvecs@ya.ru

² ООО «Научно-техническая компания ЗаВеТ-ГЕО». 630102, Россия, г. Новосибирск, ул. Восход, 26/1, оф. 56; e-mail: ZlobinskyAV@newmail.ru

Аннотация. Для более широкого использования электроразведки в геофизической практике необходимо своевременно поддерживать с математической стороны любые новации в электроразведке зондирований становлением (ЗС), возникающие по оригинальным методологическим соображениям, либо по технологическим условиям, либо просто по условиям на местности (сложная дикая местность, море, густонаселенная окультуренная зона). Вниманию читателей предлагается универсальное математическое обеспечение ЗС для произвольного плоского источника, а также программа для произвольно ориентированных электрических линий в слоистом пространстве. Приводится также обзор способов решения одномерной задачи ЗС.

Ключевые слова. Зондирования становлением, ЗСБ, ТЕ-поле, ТМ-поле, морская электроразведка.

UNIVERSAL SOFTWARE FOR ELECTRICAL PROSPECTING BY TRANSIENT

V.S. Mogilatov¹, A.V. Zlobinskiy²

¹ Institute of Petroleum Geology and Geophysics. Koptug ave. 3, Novosibirsk State University. Pirogova str., 2. Novosibirsk, Russia, 630090; e-mail: mvecs@ya.ru

² ZaVeT-GEO Ltd. Voskhod str., 26/1, office 56, Novosibirsk, Russia, 630102; e-mail: ZlobinskyAV@newmail.ru

Abstract. It is necessary to support any innovations in the electrical prospecting through mathematics for wider use in electrical geophysical practice. These innovations arise from the original method, due to new technology, because of the difficult conditions on the ground. The article offers a universal software for arbitrary planar source as well as a program to arbitrarily-oriented electrical lines in a layered space. There is also an overview of the methods for solving one-dimensional problem.

Key words. Transient soundings, TEM, TE field, TM field, marine electrical.

ВВЕДЕНИЕ. На рубеже 80–90-х годов, когда стали возникать программы обработки геофизических данных для персональных компьютеров, специалисты были под впечатлением широчайшего применения в структурной электроразведке петлевого варианта зондирований становлением (ЗС) для ближней зоны (ЗСБ) и обеспечили в первую очередь именно этот метод (программы ЭРА, «Подбор», TEMIX). Метод ЗСБ действительно зарекомендовал себя как надежный метод при структурных исследованиях, а также и в других (более малоглубинных) областях применения, где он при желании может называться МПП (метод переходных процессов). Между тем надежность и устойчивость результатов ЗСБ имеет и обратную сторону – геоэлектрическую скудность и обобщенность результатов. Интуитивные представления геофизиков-геоэлектриков о сложности взаимодействия реальной геологической среды и электромагнитного поля не удовлетворяются зачастую такими результатами, и они усложняют раз-
личным образом геоэлектрический эксперимент, что тотчас вызывает потребность в соответствующем матобеспечении, которое для режима установления всегда нетривиально. Особенно если объектом исследований являются также поляризационные процессы. Изменились и технологические условия. Появились компактные индукционные датчики (что

позволяет регистрировать и горизонтальные компоненты), применяются магнитометры (сквиды). Освоена точная спутниковая привязка во времени и в пространстве. В рыночных условиях реализация исторически сложившихся рекомендаций для ЗС (большие правильные петли, длинные прямые линии, прямоугольный импульс тока) слишком дорогостояща, тем более что и не является необходимой с теоретической точки зрения.

Давно возникла и устойчиво развивается морская электроразведка методом ЗС. Там есть методики с горизонтальными, вертикальными и наклонными электрическими линиями при расположении элементов установки на дне, на поверхности, на льду и в толще морской воды (например, [24], [21]). Универсальное математическое обеспечение для подобных конфигураций обеспечило бы и нужды наземно-скважинной электроразведки ЗС.

Итак, для более широкого использования электроразведки в геофизической практике необходимо своевременно поддерживать с математической стороны любые новации в электроразведке ЗС, возникающие по оригинальным методологическим соображениям, либо по технологическим условиям, либо просто по условиям на местности (сложная дикая местность, море, густонаселенная окультуренная зона).

О способах решения задачи о становлении электромагнитного поля

Численная реализация одномерных прямых задач импульсной электроразведки (зондирований становлением) заняла долгое время (с 50–60-х годов прошлого века) и тесно связана с процессом компьютеризации. Первые массовые расчеты кривых становления публиковались в виде альбомов палеток, которые и использовались для интерпретации. В СССР и России можно отметить два важных события в развитии матобеспечения для импульсной электроразведки. Большое значение имело появление программы АЛЕКС для вычислительных машин серии ЕС [11]. Вскоре, на рубеже 80–90-х годов, получили широкое распространение персональные компьютеры и появились первые программы для ПК (ЭРА, «Подбор» [6]).

Эта деятельность, разумеется, имела место во всем мире. В 90-х годах на Западе получила известность программа TEMIX. В дальнейшем, кроме упомянутых, в мире, например в Австралии, а также и в России (Москва, Санкт-Петербург, Новосибирск, Иркутск, Саратов) впоследствии появились и другие программные продукты для метода ИИЭ, а также и для других методов зондирований становлением. За долгий период создания компьютерных программ исследователи предлагали разные, а порой и неожиданные алгоритмы для расчета процесса установления.

Известны два основных традиционных способа решения одномерной задачи о становлении – «решение в частотной области» и «решение во временной области». Как известно, эти два основных подхода к решению задачи об установлении поля в слоистой среде были предложены в наиболее полной форме почти одновременно А.Н. Тихоновым [13], [15] и М.С. Шейнманом [17].

Решение по Шейнману приводит к двукратному интегралу Фурье – Ганкеля. Алгоритм, использованный Шейнманом, получил наибольшее распространение и развитие в России и за рубежом (например, [1]), несмотря на трудности в численной реализации, связанные с осциллирующими факторами в преобразованиях Фурье и Ганкеля. Разумеется, это понятно и естественно – подход имеет давнюю традицию в физике и математике и в качестве промежуточного этапа включает в себя расчет частотного режима, который является сам по себе рабочим режимом некоторых электромагнитных методов. Так что трудности численной реализации так или иначе были преодолены (в квазистационарном приближении). Наиболее значительными численными реализациями этого подхода явились в России программа Л.А. Табаровского и В.П. Соколова [11], в которой использовалась при интегрировании сплайн-интерполяция, и программы У.Л. Андерсона за рубежом, в которых он применил свой метод цифровой фильтрации [20].

Однако решение задачи установления в виде двойного интеграла Фурье – Ганкеля имеет еще тот недостаток, что оно с большим трудом поддается

асимптотическим разложениям. На его основе весьма сложно провести анализ особенностей установления поля различных источников, особенно в средах с изолирующим основанием.

Метод Тихонова некоторое время развивался в работах О.А. Скугаревской, П.П. Фролова и других авторов (например, [10], [3], [16]), однако это не привело тогда к появлению эффективной вычислительной процедуры для многослойных сред. За рубежом это решение почти не известно (можем указать лишь [28]) и мало применялось в России. Нужно заметить, что решение Тихонова вовсе не единственное представление решения задачи установления во временной области. Сам же А.Н. Тихонов дал и другое решение [14] методом многократных отражений, удобное в ранней стадии. Общий подход к решению во временной области состоит в переходе к нестационарной одномерной задаче в области пространственных гармоник, поэтому такой подход иногда называют методом устанавливающихся пространственных гармоник. Эту одномерную задачу можно решать различными способами. В работе [23] эта задача решается конечно-разностным способом. Авторы работы [19] разделили переменные (t и z) в краевой задаче и свели ее к задаче Штурма – Лиувилля, которую также предложили решать численно. Собственно, подход Тихонова состоит в последовательном аналитическом решении также и задачи Штурма – Лиувилля, получении и анализе уравнения для собственных значений, представлении решения в виде ряда по собственным функциям и аналитическом выражении коэффициентов такого представления на основании начального условия. В конце 80-х нам удалось успешно реализовать многослойный алгоритм Тихонова для расчетов процессов установления электрического и магнитного типов при возбуждении различными источниками ([4], [6]), и он обеспечивал более десятилетия быстрый расчет кривых становления в программном комплексе «Подбор» [5], когда ПК были еще слабы. При численной реализации основные трудности связаны с решением трансцендентного уравнения для собственных значений. Однако эта проблема (проблема начального приближения) решается в связи с необходимостью решать уравнение для каждого узла интегрирования в интегралах Ганкеля.

Наконец, следует упомянуть о возможности подхода к решению во временной области, основанного на аппроксимации геоэлектрической модели. Для магнитной моды, возбуждаемой токовой петлей, расположенной на дневной поверхности, можно с достаточной точностью описать непрерывную по вертикали горизонтально-слоистую геоэлектрическую среду дискретным набором проводящих плоскостей. Решение в этом случае обладает некоторой благоприятной для численных расчетов спецификой [12], [18].

Программа «Выбор-3С»

Итак, программа «Выбор-3С» обеспечивает прямое моделирование процесса установления в многослойной (одномерной) поляризующейся и анизотроп-

ной Земле от произвольного, задаваемого токовыми отрезками источника. Токовые отрезки могут образовывать связанные или несвязанные, замкнутые или заземленные последовательности. Источник возбуждается синхронно импульсом произвольной формы. Рассчитывается отклик после выключения токового импульса. Источник может быть помещен на любой другой границе помимо дневной (очевидное применение – морские работы). Производится расчет всех компонент электромагнитного поля (E_x , E_y , E_z , H_x , H_y , H_z , dB_x/dt , dB_y/dt , dB_z/dt), причем горизонтальные компоненты рассчитываются по указанному направлению. В зависимости от датчика (приемная электрическая линия, индукционный датчик, магнитометр) рассчитанный сигнал умножается на соответствующий, вводимый в программу коэффициент (длина линии, эффективная площадь датчика, коэффициент магнитометра) для трансформации сигнала в ЭДС. Приемник также может быть помещен на любую границу (фактическую или фиктивную) геоэлектрической среды, в частности, в воздух на некоторую высоту. Процесс установления может быть рассчитан с учетом анизотропии проводимости и процесса вызванной поляризации (ВП) по модели Cole – Cole [22]. В этом случае для целевых слоев среды надо указать, кроме сопротивления, поляризационные параметры η , τ и C .

«Выбор-ЗС» – универсальное средство прямого моделирования ЗС, которое всегда выручит «на первый случай», до создания специализированного матобеспечения, если применена новая эксперимен-

тальная схема. Поясним использование программы на примерах.

Пример 1. Зондирования становлением в ближней зоне (ЗСБ). На рис. 1 представлены экранные копии рабочих диалоговых окон программы «Выбор-ЗС». Таких окон, собственно, два. В первом, которым и открывается программа, представлены конфигурация источника и схема точек наблюдения (пикетов) сигналов, возбуждаемых этим источником. Используется некоторая система координат, определяемая указанием координат концов линий с током и пикетов. Здесь же представлены форма питающего импульса и стартовая среда при работе с пикетами, относимая к данной площади. Вся эта совокупность вместе с содержанием пикетов объявляется «группой». Группа имеет наименование и хранится в базе для возможного вызова и работы с ней. Окно группы позволяет редактировать все элементы (источник, расположение и численность пикетов, импульс), кроме стартовой групповой среды, которая уточняется и редактируется в каком-либо пикете. Имеется в виду второе окно, которое открывается для каждого пикета. Здесь мы имеем полевую кривую, можем редактировать среду и делать расчет теоретической кривой становления, которая сравнивается с полевой. В окне пикета также можно отредактировать кривую, выбрать компоненту электромагнитного поля, задать координаты пикета и коэффициент усиления, а также определить границу между слоями, на которой находится точка измерения (пикет).

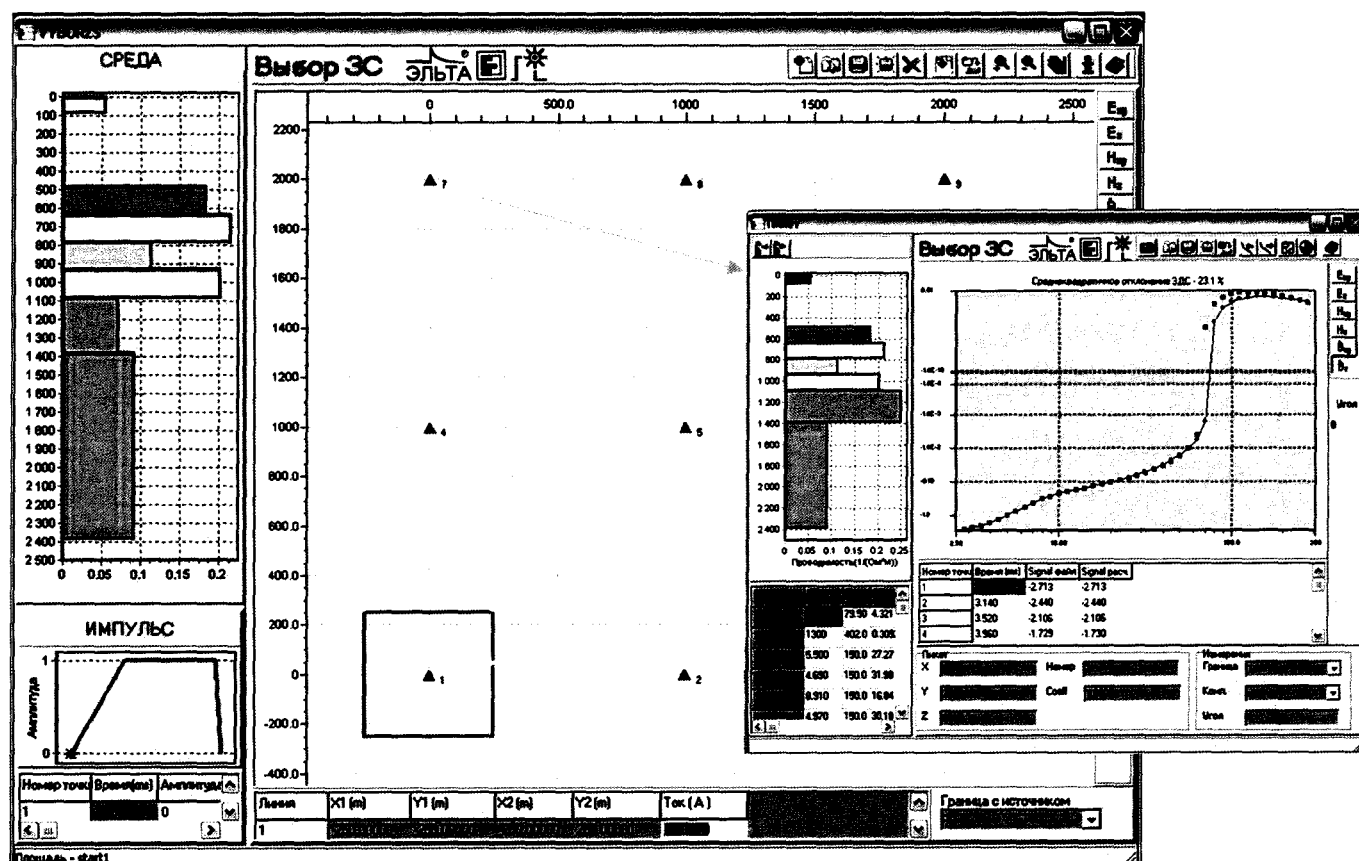


Рис. 1.
Зондирования становлением в ближней зоне (ЗСБ)

В примере на рис. 1 источник состоит из четырех линий и образует принятую в ЗСБ квадратную петлю (500 x 500 м). Учтена реальная форма импульса тока. Центр петли находится в точке $x = 500, y = 500$ (на что указывают видимые на рисунке координаты первой стороны-линии). Один пикет располагается в центре (соосная установка), и есть вынесенные пикеты. В окне пикета (как пример, пикет 7) представлены полевая кривая «разнесенных» зондирований (с переходом через 0) и сравниваемая с ней теоретическая кривая для корректируемой (табличным способом и посредством мышки) здесь же среды. Можно заметить указания на то, что в группе используются измерения скорости вертикальной магнитной индукции (dB_z/dt), т.е. применяется индукционный датчик, лежащий на земле, а источник и приемник помещены на дневную поверхность. В данном примере ток в линии ($4 \cdot 10^9$) задан как произведение собственно тока (40 А), эффективного момента датчика (100000 м²) и коэффициента 1000, что дает значения сигнала в виде ЭДС в мВ. Однако в окне пикета также задается коэффициент (в примере он 1), в который можно было бы (и даже естественнее) отнести момент датчика и пересчет в милливольты (для таких вещей он и предназначен).

Пример 2. Большая петля. Плотные обширные площадные исследования с закрепленным источником можно организовать, реализовав источник в виде очень большой токовой петли. Возбуждение среды происходит на большом участке. Измерения производятся вне петли и внутри петли, возможно, с частым шагом (что подразумевает малоглубинные цели. Программа «Выбор-ЗС» позволяет про-

извести соответствующее моделирование. Важно, что вы можете располагать петлю, соотносясь с благоприятными особенностями местности (дороги, реки, просеки, опушки леса или перелески и прочее). Необходимо лишь установить координаты вершин (координаты концов линий). Спутниковая привязка крайне удобна в этом случае. Форма петли – какая уж получилась по факту – учтется при моделировании.

На рис. 2 петля до 4 км в поперечнике. Открытый пикет 8 содержит полевую кривую – регистрацию индукционным датчиком с вертикальным моментом и с эффективной площадью 10000 м². Ее теперь можно сравнить с теоретической кривой, стоит только нажать кнопку «Расчет». В другом открытом пикете (имя пикета «4_ dB_{xy}/dt ») содержится особый сигнал – от того же датчика (10000 м²), ориентированного горизонтально в направлении угла в 135° (вся эта информация имеется на рис. 2, т.е. в окнах программы).

Еще нужно заметить, что, конечно, программа «Выбор-ЗС» не заменяет специализированную программу обработки и интерпретации именно такой методики работ. Она поможет на первом этапе определиться с методикой, опробовать ее и определить эффективность в данных условиях.

Пример 3. Электрическая заземленная линия. Однажды в начале 2000-х небольшая фирма в Англии, специализирующаяся на изготовлении очень тонких приборов – квантовых магнитометров (сквиды), взялась провести электроразведочные работы на нефть. Они решили использовать большую электрическую линию и измерять установление самого

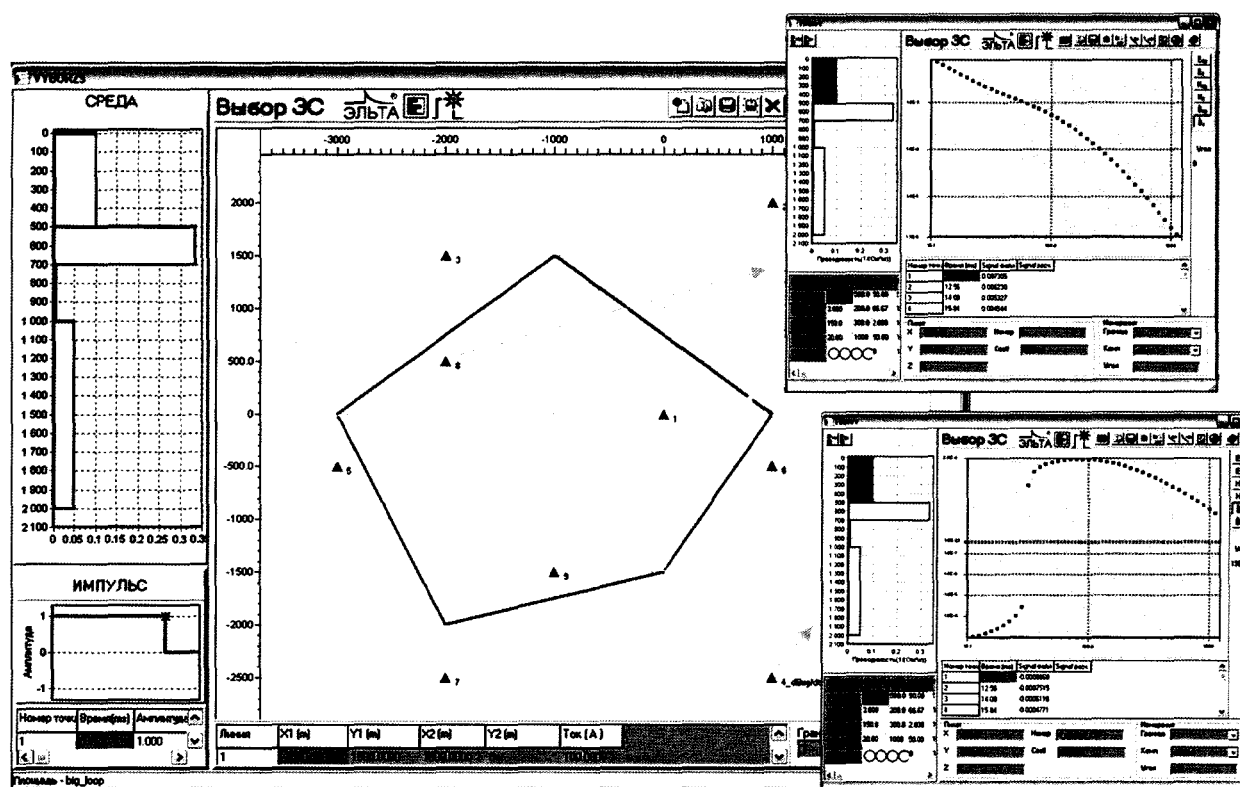


Рис. 2.
Большая петля

магнитного поля этими самыми сквидами. Сделали импульсный источник тока на 150 А, но с длинным фронтом выключения. Всю электрическую линию по прямой они выложить не могли (окрестные владельцы земли были несговорчивы), а выложили вдоль дорог и каналов. Получилась ломаная линия. Вот такие очень нестандартные ЗС. Авторы оказали им помощь в математическом плане и тогда же обзавелись убеждением, что неплохо бы иметь некое универсальное матобеспечение для ЗС.

Представляем на рис. 3 ситуацию, близкую к описанной и с легкостью воспроизведенную в программе «Выбор-ЗС». Моделируются разнообразные измерения – E_x , E_y , H_z и dB_z/dt .

Пример 4. Зондирования вертикальными токами (ЗВТ). Наконец, приведем эпизод с моделированием процесса становления особого рода – процесса установления поля электрического типа (ТМ), которое возбуждается с дневной поверхности единственным возможным способом – применением специального источника, называемого круговым электрическим диполем (КЭД). Источник реализуется набором радиально расположенных линий с одинаковым током. Суть такой конфигурации в том, что при этом компенсируется индуктивная составляющая (поле магнитного типа – ТЕ, используемая в петлевом возбуждении) и остается гальваническая. При этом в магнитных компонентах отклик вмещающей горизонтально-слоистой среды отсутствует, а процесс становления на дневной поверхности проявляет себя радиальным электрическим градиентом, естественно, осложненным процессами ВП. КЭД применяется в методе зондирования вертикальными токами (ЗВТ) [7].

На рис. 4 зафиксирован процесс моделирования сигналов от установки КЭД. На пикете 8 «измерен» сигнал радиальной 100-метровой линией. Сигнал, очевидно, осложнен процессами ВП (переход через 0 и медленное затухание). Теоретическая кривая, рассчитанная без учета параметров ВП, совсем другая – однополярная, быстропадающая. Но мы имеем возможность, вводя параметры ВП, подобрать соответствующий поляризующийся разрез.

На пикете 20 выполнены измерения вертикальной скорости индукции. Зафиксировано очень слабое остаточное магнитное поле, возникающее из-за неидеальности источника (конечное число лучей).

Пример 5. Морской вариант (погружение источника-приемника). В морских электроразведочных работах обычно используется линия, располагаемая на дне. На рис. 5 моделируется эта ситуация (слой воды $h = 100$ м, $\rho = 0,1$ Ом*м). Ток в линии большой (500 А), что возможно в море, где имеются мощные судовые генераторы. Однако коммутатор не справляется с выключением такого тока, и фронт очень растянут (50 мс). Как легко проверить в программе, такой фронт влияет на кривые установления, но это не беда, форма импульса учтена в прямой задаче. Измерения в этом примере также разнообразны. Используются большие времена, учитывая наличие в разрезе сильно проводящего слоя (морская вода) – до 4,5 сек. На пикете 6 сделаны «обычные» измерения индукционным датчиком (200000 м^2) вертикальной скорости индукции на дневной поверхности (поверхности моря). На пикете 7 произведены измерения электрической составляющей (E_x) с помощью 300-метровой линии,

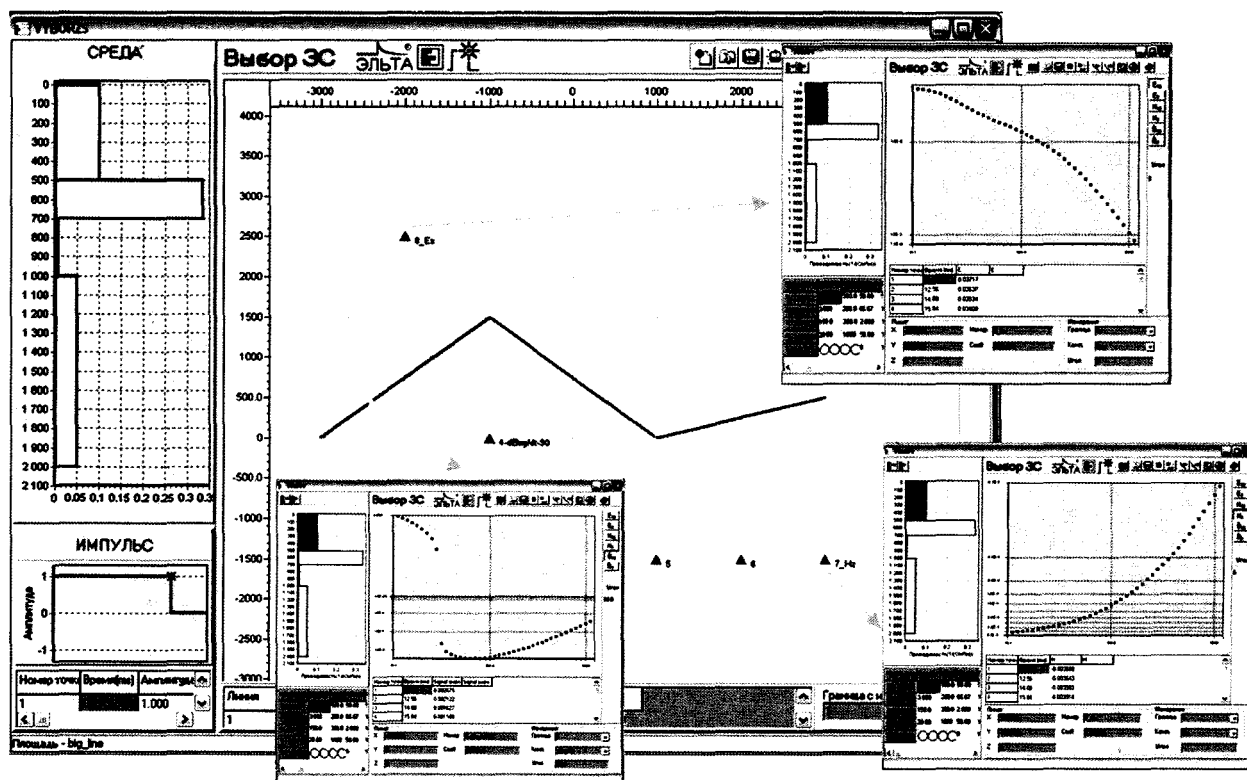


Рис. 3.
«Ломаная» электрическая заземленная линия

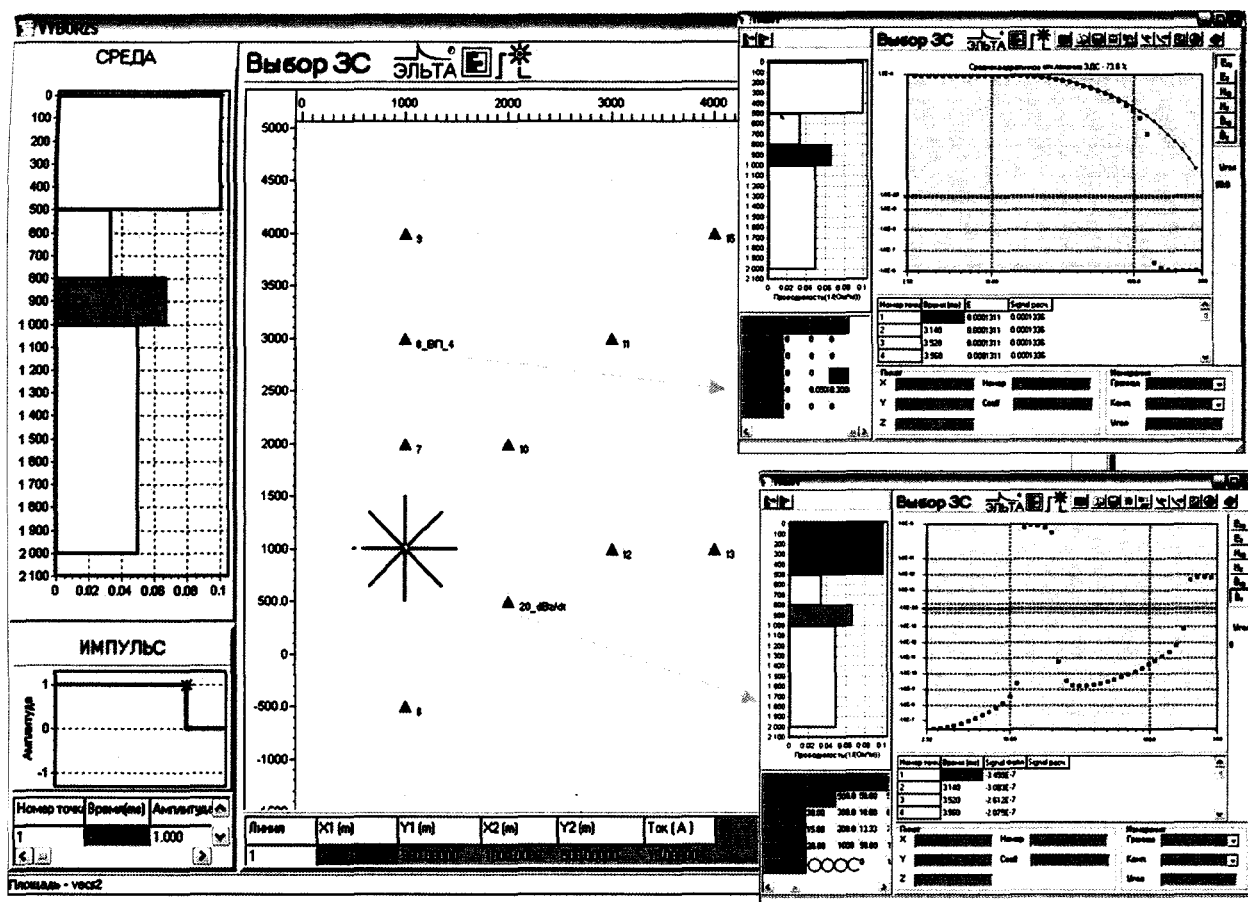


Рис. 4.
Моделирование сигналов зондирования вертикальными токами (ЗВТ)

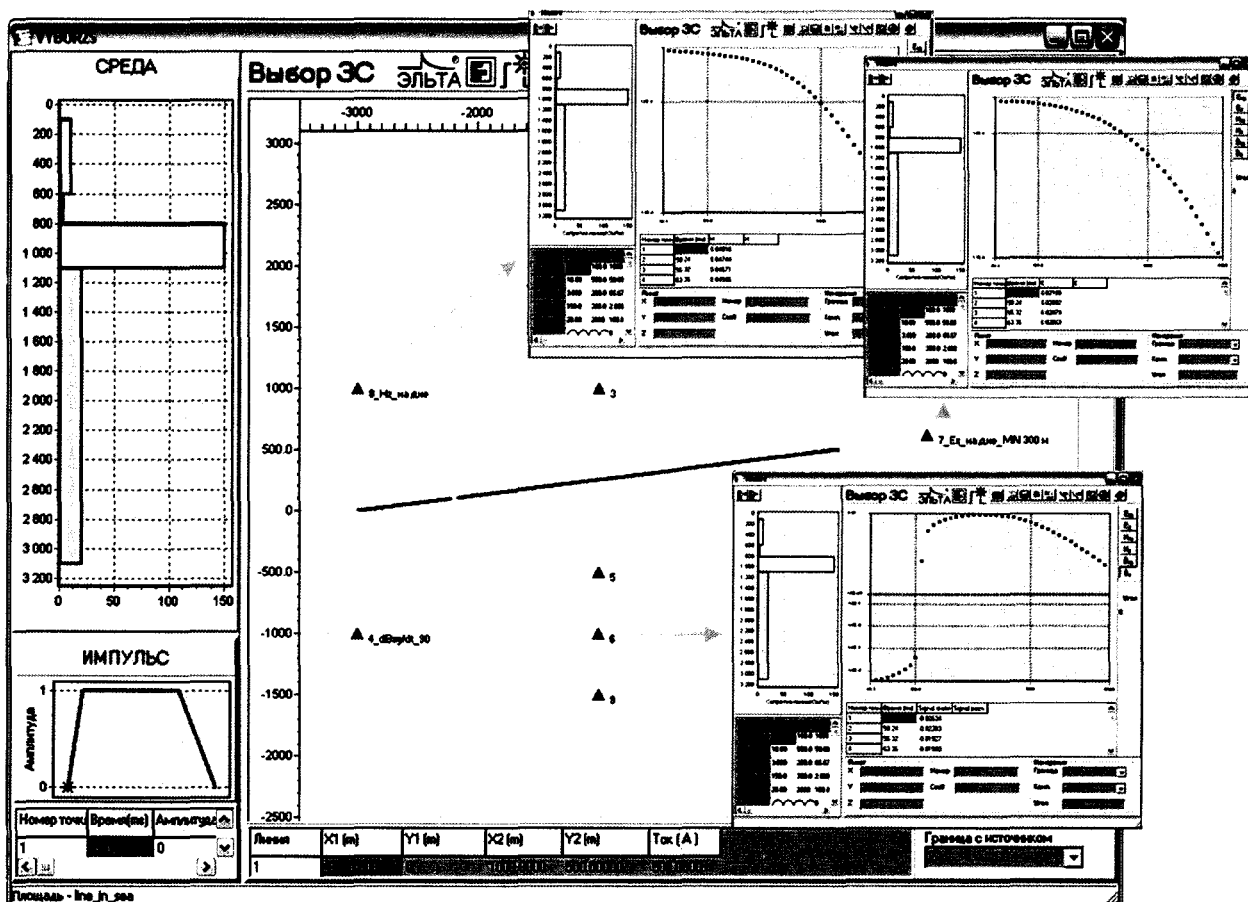


Рис. 5.
Электрическая линия на дне моря

располагаемой на дне. На пикете 8 был опущен на дно магнитометр и измерен процесс установления компоненты H_z . И все эти сигналы могут быть смоделированы в программе «Выбор-3С» для заданной среды и с учетом всех условий.

Все вышеприведенные примеры сохранены как отдельные «группы» в базе программы «Выбор-3С», и пользователь сам может продолжить анализ. Но, разумеется, программа для этого и создана, можно синтезировать новые ситуации. Псевдополевые кривые, которые используются в этих примерах, создаются в программе благодаря очень полезной возможности придать теоретическому сигналу статус полевого для дальнейшего сравнительного анализа.

Алгоритмы программы «Выбор-3С»

Основной алгоритм программы «Выбор-3С» состоит в суммировании полей горизонтальных электрических диполей в частотной области и в области пространственных гармоник. При этом одномерная задача в области пространственных гармоник решается «один раз» для всех составляющих реальную питающую установку диполей. Последующим преобразованием Фурье решение переводится во временную область. Подробное описание можно найти, например, в работах [1], [6], [7]. Далее мы кратко касаемся дополнительных алгоритмов, используемых в программе «Выбор-3С».

Анизотропия. Реальная среда практически всегда обладает анизотропией проводимости. Обычно рассматривают анизотропию с осями, совпадающими с декартовыми. Тогда проводимость описывается тензором:

$$\hat{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Даже эта не самая сложная модель анизотропии весьма существенно осложняет решение. Однако основной моделью считается еще более простая ситуация, когда $\sigma_x = \sigma_y$. Обычно вертикальная проводимость меньше горизонтальной. Такая анизотропия мало изменяет приведенное выше решение. Мы должны в системе уравнений Максвелла использовать тензор (1) с $\sigma_x = \sigma_y$ и вместо $\operatorname{div} \mathbf{E} = 0$ требовать $\operatorname{div} \mathbf{j} = 0$.

Легко понять, принимая во внимание структуру электрических полей, что поле магнитного типа зависит только от горизонтальных сопротивлений, тогда как поле электрического типа зависит от анизотропии, т.е. от горизонтальных и вертикальных сопротивлений. За годы увлечения индуктивной импульсной электроразведкой (вроде ЗСБ) электроразведчики подзабыли о параметре анизотропии, который был весьма существенным в методах постоянного тока (постоянное поле электрического типа). Программа «Выбор-3С» позволяет учесть анизотропию в процессе становления.

Учет вызванной поляризации. Еще одним уточнением свойств среды, которое возможно моделировать в программе «Выбор-3С», является учет частотной дисперсии удельного сопротивления. Можно

рассматривать эту дисперсию как кажущееся проявление сложных физико-химических процессов (процессы вызванной поляризации), возникающих в сложной на микроуровне геологической среде при протекании электрического тока. Широкое распространение получил феноменологический подход к описанию вызванной поляризации (ВП) в виде модели Cole-Cole [22]:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \cdot \left[1 - \eta \cdot \frac{(i\omega\tau)^c}{1 + (i\omega\tau)^c} \right]. \quad (2)$$

Таким образом, для учета процессов вызванной поляризации в программе «Выбор-3С» нужно для каждого поляризующегося слоя ввести три параметра — η , τ и C .

Сложный импульс возбуждения. Теоретические исследования и методические рекомендации в импульсной электроразведке тяготеют к такому способу импульсного возбуждения, когда постоянный ток мгновенно выключается. На практике длительность пропускания тока регламентируется глубиной зондирования, а также по экономическим и временным соображениям. Так что длительность импульса влияет на позднюю стадию становления. В ранней стадии сказывается фронт выключения, который не может быть слишком коротким по техническим причинам. В общем, возникает необходимость учесть реальные параметры токового импульса при решении прямой задачи. Кроме того, возникали в свое время идеи использовать специальную форму импульса для оптимизации зондирования (компенсационный метод переходных процессов (КМПП), например, был реализован). Однако возможности индуктивной импульсной электроразведки, т.е. электроразведки с применением поля магнитного типа, в этом отношении сильно ограничены. Приводим формулу (3) для поздней стадии ТЕ-процесса, которая утверждает, что зависимость от формы $(q(\tau))$ импульса исчезает, а влияет только «площадь» импульса $(H(t) - \text{поле от «ступеньки»})$.

$$\tilde{H}(t) = H(t) \cdot \frac{1}{t} \int_{\tau_1}^{\tau_2} q(\tau) d\tau. \quad (3)$$

Гораздо интереснее зависит от формы импульса процесс установления поля электрического типа (ТМ-поле). Формула (4) описывает позднюю стадию процесса становления ТМ-поля в слое с изолирующим основанием. Сохраняется зависимость от формы импульса, причем посредством и с участием геоэлектрических параметров.

$$\tilde{E}(t) = E(t) \cdot \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{dq(\tau)}{d\tau} \exp\left(\frac{\tau\pi^2}{\mu\sigma h^2}\right) d\tau. \quad (4)$$

Так или иначе, возможность произвольной формы токового импульса является важной в современном матобеспечении импульсной электроразведки, и такая возможность реализована в программе «Выбор-3С» (сложный импульс используется выше в первом примере, рис. 1, а также в «морском» примере, рис. 5).

Инверсия в программе «Выбор-3С». Программа «Выбор-3С» предназначена прежде всего для решения прямых задач (одномерных), т.е., описав среду посредством геоэлектрической модели и задав параметры источника, применяя соответствующий математический аппарат (например, описанный выше), мы определяем все компоненты поля в любой точке пространства. Это вполне определенная задача, имеющая единственное решение. Обратная процедура, когда мы имеем значения поля в некоторой области пространства, знаем, естественно, параметры своей приемно-питающей установки и пытаемся определить строение среды (обратная задача), гораздо менее определена, обычно не корректна и является серьезной проблемой даже в теоретическом отношении (например, [8]). Практически же геофизики, так или иначе, должны решать эту задачу в своей повседневной работе, и они придумали много интересных практических подходов. Процесс решения обратной задачи может быть сложным и многоступенчатым, включает привлечение различных данных (кроме, собственно, обрабатываемых), трансформации, визуализации и компьютерное моделирование. Используются также процедуры автоматического решения обратной задачи (инверсии) конкретных данных, например, кривой становления (или группы таких кривых). В этом, более узком смысле программа «Выбор-3С» обладает процедурами решения обратной задачи (инверсии). В них решается задача минимизации невязки между полевой кривой и теоретической при варьировании модели среды. В программе «Выбор-3С» используются алгоритмы Левенберга – Марквардта, [25], [26] и Нелдера – Мида [27].

Вертикальные линии

Представленная выше программа «Выбор-3С» предоставляет, конечно, широкие возможности для новаций в электромагнитных импульсных зондированиях. Однако источник, даже сложный, предусматривается «плоским» и должен размещаться в одной горизонтальной плоскости, хотя бы и погру-

женной. Таким образом, в программе «Выбор-3С» не рассматривается важный случай источников – вертикальные электрические линии, которые используются на практике в море и (в меньшей степени) для наземно-скважинных исследований. Конечно, расчет установления от строго вертикальной линии давно освоен [2], и мы не можем выдавать это за новый результат. Здесь мы представим много более универсальную программу, в которой делается расчет переходной ЭДС в наклонной измерительной линии, возбуждаемой выключением тока в наклонной же питающей линии. Конфигурация показана на рис. 6. Предполагается система координат, в которой ось X направлена вправо, ось Z направлена вниз, а ось Y к «зрителю». Начало координат ($z = 0$) располагается на первой границе. Линии своими концами располагаются на границах – реальных или мнимых. Питающая линия определяется координатами по оси X – A_x и B_x и номерами границ с электродами – iA и iB . Соответственно, для приемной – M_x , N_x , iM , iN . Таким образом, питающая линия размещается в плоскости XZ, а приемная линия размещается в любой плоскости, параллельной плоскости XZ (т.е. для приемной линии следует указать еще координату y).

Особое значение такой программы состоит в том, что появляется возможность оценить влияние отклонений в реальной приемно-питающей установке ABMN от горизонтали или вертикали. Такое влияние может быть критичным для вертикальных линий, поскольку при отклонении от вертикали приемной и питающей линии появляется ТЕ-мода, которая может фатальным образом исказить сигнал относительно ожидаемой ТМ-моды.

Алгоритм программы ELinc2 для расчета переходных сигналов от наклонной заземленной линии очевидным образом сводится к суммированию полей вертикальных и горизонтальных диполей вдоль наклонных питающей и приемной линий. Расчет полей горизонтальных (ГЭД) и вертикальных (ВЭД) электрических диполей вполне освоен, и мы тут можем отослать к таким работам, как [1], [2], [4], [5],

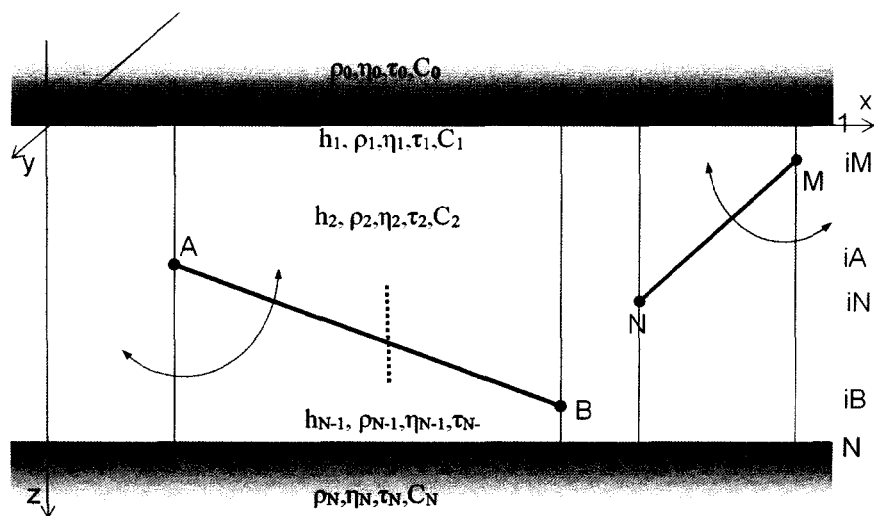


Рис. 6.
Конфигурация в программе ELinc2

[6]. Приведем лишь общее представление в частотной области:

$$f(x, y, z, \omega) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f^*(\xi, \eta, z, \omega) e^{i\xi x} e^{i\eta y} d\xi d\eta, \quad (5)$$

т.е. в виде двукратного интеграла Фурье по пространственным гармоникам. Подынтегральная функция $f^*(\xi, \eta, z, \omega)$ в (5) – решение одномерной слоистой задачи рассчитывается рекуррентным образом сразу для ГЭД и ВЭД.

Однако это суммирование полей отдельных диполей можно производить различным образом. Проще всего это делать «в лоб», рассчитывая интегральные решения для каждого отдельного диполя. Это приводит к большим затратам машинных ресурсов. Мы пошли по другому пути, производя суммирование диполей в виде аналитического интегрирования в области пространственных гармоник и при решении одномерной краевой задачи. Выражение (5) позволяет наиболее просто произвести интегрирования в явном аналитическом виде по горизонтальным координатам (x, y) . Такой подход позволяет экономить время, однако делает алгоритм довольно сложным. Необходимость производить интегрирование вдоль наклонных линий в условиях близости и пересечения границ среды приводит к новым алгоритмическим приемам при численной реализации.

Что касается трансформации во временную область, это делается обычным образом посредством трансформации Фурье (для ступенчатого импульса):

$$F(x, y, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{-i\omega} f(x, y, z, \omega) e^{-i\omega t} d\omega. \quad (6)$$

Для улучшения сходимости и преодоления осциллирующих факторов в интегралах (5) и (6) мы применяем единообразно весьма эффективный и универсальный метод деформации пути интегрирования в комплексной области. Интересно, что, учитывая и вид решения одномерной краевой задачи, в целом такой подход позволяет построить весь алгоритм программы ELinc2 исключительно и только на вычислении экспонент от комплексного показателя. Никаких других функций (тем более специальных) в основных процессах программы ELinc2 не используется.

При тестировании программы ELinc2 использовались расчеты по ранее апробированным программам для строго горизонтальных и вертикальных линий, а в случае наклонов привлекались расчеты методом конечных элементов (расчеты предоставлены М.Г. Персовой), а также расчеты по программе А.Е. Каминского (предоставлены ООО «СГНПК»). Укажем также на косвенные, но весьма эффективные способы тестирования, которые мы использовали, основанные на вращении всей установки в псевдослоистом (на самом деле однородном) пространстве, а также и на теореме взаимности (если измеряется ЭДС, то роли источника и приемника можно взаимно поменять, и результат не должен измениться).

Продemonстрируем применение программы ELinc2 при анализе методики морской электро-разведки, использующей устанавливаемое поле вертикальной электрической линии. Такая методика ([21], [24]) дает, в принципе, возможность воспользоваться замечательными свойствами поля электрического типа (ТМ-поля), которое, между прочим, обладает высокой чувствительностью к горизонтам повышенного сопротивления (содержащими углеводородные залежи, например). Однако наклоны питающей и приемной линий приводят к появлению и вкладу в сигнал долгоживущей ТЕ-моды (поле магнитного типа), что может радикально исказить переходный процесс в поздней стадии.

На рис. 7 показаны среда и расположение питающих (длина 1000 м, ток 1000 А) и приемных (длина 600 м, разнос 100 м) линий так, что рассматриваются три случая. В первом случае линии строго вертикальны, во втором – наклонены в одну сторону на 2 градуса, и в третьем – наклонены в разные стороны. Заметим, что море стратифицировано по разной солености (проводимости), а основание разреза – изолирующее. Результаты расчетов представлены на рис. 7 в виде переходных кривых ЭДС. Учитывая билогарифмический масштаб, можно видеть, что затухание сигнала в случае вертикальных линий происходит экспоненциально. Это хорошо известный факт (например, [2]) для поля вертикальной линии над изолирующим основанием и характерное свойство ТМ-поля. Но наклоны приводят к степенной зависимости (влияние ТЕ-поля), причем

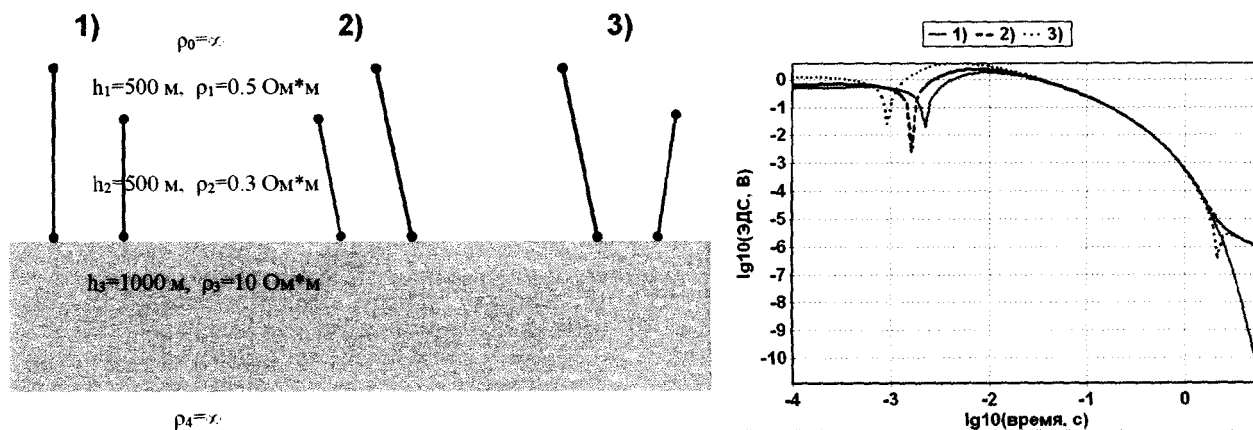


Рис. 7. Влияние наклонов. Модель среды, установки и кривые ЭДС

одна из кривых даже меняет знак в поздней стадии. В данной ситуации влияние наклонов заметно и даже критично при хорошо измеримом уровне сигнала. Впрочем, имеется все же диапазон (от 10 мс до 2 с), где влияния наклонов нет. Так что нужно далее посмотреть, удастся ли зафиксировать аномалию от интересующего горизонта в диапазоне времен, в котором ослаблено влияние наклонов. Что можно сделать опять-таки с помощью программы EInc2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Представленное матобеспечение ЗС при всей заявленной универсальности, конечно, не исчерпывает все мыслимые и даже реально используемые модификации. Например, в море возможны источники с горизонтальным магнитным моментом. Кроме того, если говорить о современном матобеспечении для ЗС, то необходимо иметь в виду еще трехмерные задачи и соответствующие процедуры инверсии. Мы также напоминаем, что программа «Выбор-ЗС» не заменяет программу обработки каждого конкретного метода. Таковую как, например, программа «Подбор» для петлевого варианта ЗСБ. Но, и это факт, на основе программы «Выбор-ЗС» был создан целый ряд программ для специфических методик проведения работ, где учитывались все тонкости конфигураций приемно-питающих установок, а также добавлялись профильные и площадные построения. Представленное в этой статье матобеспечение позволяет все же электроразведчикам осознанно и на основе базового одномерного моделирования оптимизировать полевые методики, предлагать новые и расширять сферу применения электроразведки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1965. 109 с.
2. Гольдман М.М., Могилатов В.С. Становление поля вертикального электрического диполя, погруженного в горизонтально-слоистое полупространство // Теория и опыт применения электромагнитных полей в разведочной геофизике: сб. науч. тр. / ИГиГ СО АН СССР. Новосибирск, 1978. С. 123–138.
3. Дмитриев В.И., Скугаревская О.А., Фролов П.П. Некоторые вопросы метода становления поля в ближней зоне. М.: Изд-во МГУ, 1973. 50 с.
4. Могилатов В.С. Об одном способе решения основной прямой задачи электроразведки ЗС // Геология и геофизика. 1993. №3. С. 108–117.
5. Могилатов В.С., Захаркин А.К., Злобинский А.В. Математическое обеспечение электроразведки ЗСБ. Система «Подбор». Новосибирск: Изд. СО РАН, 2007. 157 с.
6. Могилатов В.С., Злобинский А.В. Математическое обеспечение индуктивной импульсной электроразведки // Сибирский журнал индустриальной математики. 2006. Т. IX, №1(25). С. 91–105.
7. Могилатов В.С. Импульсная геоэлектрика. Новосибирск: Изд. НГУ, 2014. 182 с.
8. Романов В.Г., Кабанихин С.И. Обратные задачи геоэлектрики. М.: Наука, 1991. 303 с.
9. Скугаревская О.А. О конечной стадии процесса становления электрического тока в слое, лежащем на идеально проводящем основании // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1951. №6. С. 37–49.
10. Скугаревская О.А. Расчет конечной стадии процесса становления электрического поля в трехслойной среде // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1959. №1. С. 59–72.

11. Табаровский Л.А., Соколов В.П. Программа расчета нестационарного поля дипольных источников в горизонтально-слоистой среде (АЛЕКС) // Электромагнитные методы геофизических исследований. Новосибирск: Изд-во ИГиГ СО АН СССР, 1982. С. 57–77.

12. Табаровский Л.А., Энов М.И. Дискретные спектры в задачах дифракции нестационарного поля на пленках Шейнмана // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1998. №9. С. 46–54.

13. Тихонов А.Н. О становлении электрического тока в однородном проводящем полупространстве // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1946. Т. 10, №3. С. 213–231.

14. Тихонов А.Н. О становлении электрического тока в неоднородной слоистой среде // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1950. Т. 14, №3. С. 199–222.

15. Тихонов А.Н., Скугаревская О.А. О становлении электрического тока в неоднородной среде II // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1950. Т. 14, №4. С. 281–293.

16. Фролов П.П. Об асимптотическом поведении становления поля в слоистой среде // Изв. РАН. Сер. Физика Земли. 1965. №1.

17. Шейнман С.М. Об установлении электромагнитных полей в земле // Прикл. геофизика. 1947. Вып. 9. С. 3–55.

18. Энов М.И., Ельцов И.Н. Прямые и обратные задачи индуктивной геоэлектрики в одномерных средах. Новосибирск: Изд-во ОГТИМ СО РАН, 1992. 31 с.

19. Энов М.И., Ельцов И.Н. Релаксация электромагнитного поля дипольного источника в проводящем слоистом пласте, погруженном в изолятор // Геология и геофизика. 1991. №10. С. 126–129.

20. Anderson W.L. A hybrid fast Hankel transform algorithm for electromagnetic modelling // Geophysics. 1989. V. 54, №2. P. 263–266.

21. Barsukov P.O. and Fainberg E.B. Marine transient electromagnetic sounding of deep buried hydrocarbon reservoirs: principles, methodologies and limitations // Geophysical Prospecting. 2016. Version of Record online: 1 SEP 2016, DOI: 10.1111/1365-2478.12416.

22. Cole K.S., Cole R.H. Dispersion and Absorption in Dielectrics – I. Alternating Current Characteristics // J. Chem. Phys. 1941. V. 9.4. P. 341–351.

23. Goldman M.M. The integral finite difference method for calculating transient electromagnetic fields in a horizontally stratified medium // Geophysical Prospecting. 1983. V. 31, №4. P. 664–686.

24. Goldman M., Mogilatov V., Haroon A., Levi E., Tezkan B. Signal detectability of marine electromagnetic methods in the exploration of resistive targets // Geophysical Prospecting. 2015. V. 63. P. 192–210.

25. Levenberg K.A. Method for solution of certain nonlinear problems in least squares // Quart. Appl. Math. 1944. V. 2. P. 164–168.

26. Marquardt O.W. An algorithm of least squares estimation of nonlinear parameters // J. Soc. Indust. Appl. Math. 1963. V. 11. P. 431–441.

27. Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization // Computer Journal. 1965. №7. P. 308–313.

28. Pracser E. Fast computing of transient electromagnetic field on the surface of a layered halfspace // Geofiz. kozl. 1992. V. 37, №2–3. P. 159–176.

REFERENCES

1. Vanian LL. Osnovy elektromagnitnyh zondirovaniy [Basics of the electromagnetic soundings]. Moscow: Nedra; 1965. 109 p.
2. Goldman MM, Mogilatov VS. Stanovlenie polya vertikalnogo elektricheskogo dipolya, pogrushennogo v gorizontarno-sloistoe poluprostranstvo [Transient field of the vertical electric dipole in the layered halfspace]. Teoria i opyt primeneniya elektromagnitnyh polej v razvedochnoj geofizike: sb. nauch. tr. IGIG SB AS USSR. Novosibirsk; 1978. P. 123–138 (in Russ.).

3. Dmitriev VI, Skugarevskaya OA, Frolov PP. Nekotorye voprosy metoda stanovleniya v blizhnej zone [Some problems of the transient method in the near zone]. Moscow: Izd-vo MSU; 1973. 50 p.
4. Mogilatov VS. Ob odnom sposobe resheniya osnovnoj pryamoj zadachi elektrorazvedki ZS [On a method of solving the forward problem of transient electrical]. *Geologiya i geofizika*. 1993; (3): 108–117.
5. Mogilatov VS, Zaharkin AK, Zlobinskiy AV. Matematicheskoe obespechenie elektrorazvedki ZSB. Sistema «Podbor» [Software for TEM. System «Podbor»]. Novosibirsk: Izd. SB RAS, 2007. 157 p.
6. Mogilatov VS, Zlobinskiy AV. Matematicheskoe obespechenie induktivnoj impulsnoj elektrorazvedki [Software for the inductive pulse electrical]. *Sibirskij zhurnal industrialnoj matematiki*. 2006; 9(1) 25: 91–105.
7. Mogilatov VS. Impulsnaya geoelektrika [Pulse geoelectrics]. Novosibirsk: Izd. NSU; 2014. 182 p.
8. Romanov VG, Kabanihin SI. Obratnye zadachi geoelektriki [Inverse problem of the geoelectrics]. Moscow: Nauka; 1991. 303 p.
9. Skugarevskaya OA. O konechnoj stadii processa stanovleniya elektricheskogo toka v sloe, lezhatshem na idealno provodyashhem osnovanii [On the final stage of the transient electrical current in the layer, which lies on a perfectly conducting base]. *Izv. AS USSR. Ser. geofiz.* 1951; (6): 37–49.
10. Skugarevskaya OA. Raschet konechnoj stadii processa stanovleniya elektricheskogo polya v trehslojnoj srede [Calculation of the final stage of the transient process of the electric field in a three-layer medium]. *Izv. AS USSR. Ser. geofiz.* 1959; (1): 59–72.
11. Tabarovskiy LA, Sokolov VP. Programma rascheta nestatsionarnogo polya dipolnyh istochnikov v gorizontalslojnoj srede (ALEKS) [The program for calculation of the non-stationary field from the dipole source in a horizontally-layered medium (ALEX)]. *Elektromagnitnye metody geofizicheskikh issledovaniy*. Novosibirsk: izd-vo IG:G SBAS USSR; 1982. P. 57–77.
12. Tabarovskiy LA, Epov MI. Diskretnye spektry v zadachakh difrakcii nestatsionarnogo polya na plenkax Shejnmana [Discrete spectrum in the diffraction of the non-stationary field on the Sheinman's films]. *Izv. AS USSR. Ser. Fizika Zemli*. 1998; (9): 46–54.
13. Tihonov AN. O stanovlenii elektricheskogo toka v odnorodnom provodyashhem poluprostanstve [About the transient of an electric current in a homogeneous conductive halfspace]. *Izv. AS USSR. Ser. geofiz.* 1946; 10(3): 213–231.
14. Tihonov AN. O stanovlenii elektricheskogo toka v neodnorodnoj slojnoj srede [About the transient of an electric current in an inhomogeneous medium]. *Izv. AS USSR. Ser. geogr. i geofiz.* 1950; 14(3): 199–222.
15. Tihonov AN, Skugarevskaya OA. O stanovlenii elektricheskogo toka v neodnorodnoj srede. II [About the transient of an electric current in an inhomogeneous medium. II]. *Izv. AS USSR. Ser. geogr. i geofiz.* 1950; 14(4): 281–293.
16. Frolov PP. Ob asimptoticheskom povedenii stanovleniya polya v slojnoj srede [About the asymptotic behavior of the transient field in the layered medium]. *Izv. AS USSR. Ser. Fizika Zemli*. 1965; (1).
17. Shejnman SM. Ob ustanovlenii elektromagnitnykh polej v Zemle [About the transient of an electromagnetic field in Earth]. *Prikl. geofizika*. 1947; (9): 3–55.
18. Epov MI, Eltsov IN. Pryamye i obratnye zadachi induktivnoj geoelektriki v odnomernyx sredax [Forward and inverse problems of the inductive geoelectrics in the one-dimension medium]. Novosibirsk: izd-vo OGGIM SB RAS; 1992. 31 p.
19. Epov MI, Eltsov IN. Relaksaciya elektromagnitnogo polya dipolnogo istochnika v provodyashhem sloistom plaste, pogruzhennom v izolyator [Relaxation of the electromagnetic field of a dipole source in the conductive layered medium, immersed in an insulator]. *Geologiya i geofizika*. 1991; (10): 126–129.
20. Anderson WL. A hybrid fast Hankel transform algorithm for electromagnetic modelling. *Geophysics*. 1989; 54(2): 263–266.
21. Barsukov PO, Fainberg EB. Marine transient electromagnetic sounding of deep buried hydrocarbon reservoirs: principles, methodologies and limitations. *Geophysical Prospecting*. 2016. Version of Record online: 1 sep 2016, DOI: 10.1111/1365-2478.12416.
22. Cole KS, Cole RH. Dispersion and Absorption in Dielectrics – I. Alternating Current Characteristics. *J. Chem. Phys.* 1941; 9.4: 341–351.
23. Goldman MM. The integral finite difference method for calculating transient electromagnetic fields in a horizontally stratified medium. *Geophysical Prospecting*. 1983; 31(4): 664–686.
24. Goldman M, Mogilatov V, Haroon A, Levi E, Tezkan B. Signal detectability of marine electromagnetic methods in the exploration of resistive targets. *Geophysical Prospecting*. 2015; 63: 192–210.
25. Levenberg KA. Method for solution of certain nonlinear problems in least squares. *Quart. Appl. Math.* 1944; (2): 164–168.
26. Marquardt OW. An algorithm of least squares estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. Indust. Appl. Math.* 1963; (11): 431–441.
27. Nelder JA, Mead R. A simplex method for function minimization. *Computer Journal*. 1965; (7): 308–313.
28. Pracsar E. Fast computing of transient electromagnetic field on the surface of a layered halfspace. *Geofiz. kozl.* 1992; 37(2–3): 159–176.

РЕЦЕНЗЕНТ – доктор физико-математических наук
А.Д. Каринский

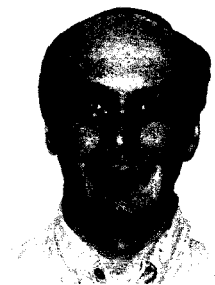
ОБ АВТОРАХ

МОГИЛАТОВ Владимир Сергеевич



Окончил физфак НГУ в 1968 г. Главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, доктор технических наук, профессор кафедры геофизики НГУ. Область научных интересов – физико-математические основы геоэлектрики с контролируемыми источниками. Автор 150 научных публикаций.

ЗЛОБИНСКИЙ Аркадий Владимирович



Окончил физфак НГУ в 1992 г. Генеральный директор научно-технической компании «ЗаВеТ-ГЕО», кандидат технических наук. Область научных интересов – методика, обработка и интерпретация результатов электромагнитных зондирований. Автор около 30 научных работ, 1 монографии.