

ФОРМИРОВАНИЕ МАКРОАНИЗОТРОПНЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОСЛОИСТОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ И РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

В.С. Могилатов

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

Точность (детальность, разрешающая способность) электроразведочного метода с искусственным источником складывается из нескольких разнородных составляющих. Среди них и модельная база, используемая при интерпретации. Реальная геологическая среда имеет сложное строение. Осадочные породы характеризуются слоистой структурой, которой присущи фрактальные свойства — слои одного масштаба распадаются, в свою очередь, на слои более мелкого масштаба. Если говорить о крупномасштабных геоэлектрических исследованиях, например, об электроразведке, мы сталкиваемся с проблемой построения соответственной геоэлектрической модели. По необходимости в электроразведке геоэлектрическая модель (одномерная) формируется как горизонтально-слоистая с толстыми (сотни метров) однородными слоями, а тонкая структура игнорируется. Для исследования некоторых аспектов этой проблемы была выполнена серия численных экспериментов, их суть состояла в изучении электромагнитных устанавливаемых откликов от пласта, сформированного из множества тонких прослоев со случайно распределенными значениями геоэлектрических параметров (в основном удельного сопротивления).

Зондирования становлением, макроанизотропия, интерпретация, геоэлектрическая модель, случайные параметры, математическое моделирование.

FORMATION OF THE MACROANISOTROPIC GEOELECTRIC PARAMETERS OF A THIN-LAYERED GEOLOGIC ENVIRONMENT AND THE RESOLUTION OF ELECTRICAL PROSPECTING

V.S. Mogilatov

The accuracy (detail, resolution) of controlled-source electrical prospecting is a combination of several disparate elements. They include the model framework used in the interpretation. A real geologic medium has a complex structure. Sedimentary rocks have a layered structure with fractal properties: The layers split into smaller ones. Large-scale geoelectrical studies (for example, electrical prospecting) require a proper geoelectrical model. By necessity, the 1D geoelectrical model in electrical prospecting is horizontally layered, with thick (hundreds of meters) homogeneous layers, whereas a fine structure is neglected. To study some aspects of this problem, we performed a set of numerical experiments. They were aimed at studying the TEM response from a formation consisting of many thin layers with random geoelectric parameters, mainly resistivity.

TDEM method, macroanisotropy, interpretation, geoelectrical model, random parameters, mathematical modeling

ВВЕДЕНИЕ

Точность (детальность, разрешающая способность) электроразведочного метода с искусственным источником складывается из нескольких разнородных составляющих. Назовем хотя бы три — установка и, следовательно, тип используемого поля (физические основания), техническая реализация (фиксация отклика) и модельная база, используемая при интерпретации. Рассмотрим только последний аспект. Нетрудно убедиться прямыми наблюдениями, что реальная геологическая среда имеет сложное строение. Осадочные породы характеризуются слоистой структурой, которой присущи фрактальные свойства — слои одного масштаба распадаются, в свою очередь, на слои более мелкого масштаба. На рис. 1 приведены яркие примеры, но практически каждый человек наблюдал где-либо подобную картину.

Понятно, что слоистая структура означает различие физических параметров вещества каждого слоя, в том числе и электромагнитных. На рис. 2 представлены результаты мелкомасштабного геоэлектрического исследования геологической среды, другими словами, результаты электрического каротажа. Это обычный вид каротажных кривых, отражающих изменения сопротивления. Как видим, сопротивление меняется весьма прихотливым образом. Надо заметить, что даже эти мелкомасштабные изменения удельного сопротивления есть результат некоторого усреднения параметров еще более тонких слоев.

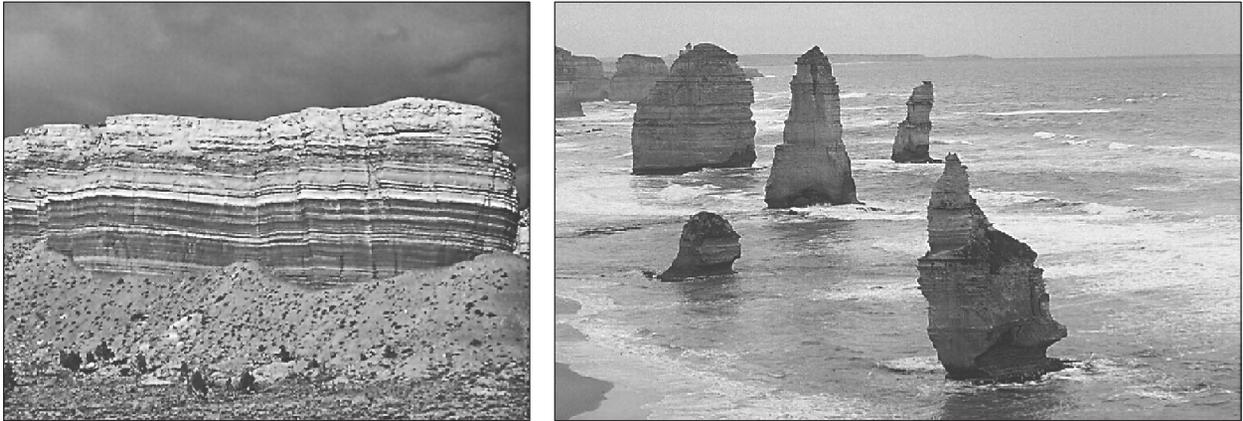


Рис. 1. Примеры обнажений, показывающие тонкую горизонтально-слоистую структуру осадочных пород.

Если говорить о крупномасштабных геоэлектрических исследованиях, например, об электроразведке, мы сталкиваемся с проблемой построения соответственной геоэлектрической модели. Понятно, что мы не можем очень подробно отражать структуру реальной геологической среды. По крайней мере, по двум причинам. Первая состоит в том, что наш крупномасштабный физический эксперимент по необходимости имеет такие пространственно-временные характеристики (частоты), при которых мелкие детали физически нивелируются. Вторая причина (тесно связанная с первой) — невозможно работать (т.е. определять, интерпретировать) с большим числом параметров.

Таким образом, по необходимости в электроразведке геоэлектрическая модель (одномерная) формируется как горизонтально-слоистая модель с толстыми (сотни метров) однородными слоями, их число довольно редко превышает 10. В классе таких моделей с числом параметров порядка 20 (десять сопротивлений и десять мощностей) и происходит интерпретация электроразведочных данных. Например, тонкослоистая среда, отраженная на каротажной кривой (см. рис. 2), в электроразведке будет интерпретироваться как, вероятно, трехслойная с границами на глубине 200 и 400 м.

При этом, как правило, не учитывается тонкое строение того или иного слоя (в том числе маломощных пропластков, характеризующихся большим разбросом не только удельных сопротивлений, но также диэлектрических и магнитных проницаемостей). В этом случае несоответствие модельных представлений и реальной среды может проявляться как частотно-временная дисперсия «истинных» удельных электрических сопротивлений. Может быть, нужно говорить о геометрической или структурной, или о модельной дисперсии. Но ведь эту наблюдаемую дисперсию можно связать с вызванной поляризацией (ВП), определить кажущиеся параметры ВП и получить совершенно ложные выводы о вещественном составе среды!

Для исследования некоторых аспектов этой проблемы нами была выполнена серия численных экспериментов, их суть состояла в изучении электромагнитных устанавливающихся откликов от пласта, сформированного из множества тонких прослоев со случайно распределенными значениями геоэлектрических параметров (в основном удельного сопротивления). Значения полученных полей сравнивались со значениями поля эквивалентного однородного пласта. Что значит эквивалентный, мы объясняем ниже.

Следует отметить, что в этом смысле имеются существенные отличия при возбуждении токов в среде индуктивными и гальваническими источниками или по сути между геоэлектромагнитными процессами установления электрического и магнитного типов. Поэтому в работе исследуются эквивалентные тонкослоистые модели при воздействии полей трех типов — магнитного, электрического и, наконец, при воздействии смешанного поля.

ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКОСЛОИСТОЙ СЛУЧАЙНОЙ МОДЕЛИ И ЭКВИВАЛЕНТНОГО ОДНОРОДНОГО СЛОЯ

Вопрос об эквивалентности тонкослоистого и однородного пласта совсем не простой. Во-первых, отметим очевидную вещь, что это разные физические объекты. Один из них гораздо более сложный, чем другой. Понятно, что эквивалентность может иметь только относительный и условный характер, а не абсолютный. Мы должны постоянно иметь в виду, что здесь речь идет об эквивалентности в контексте

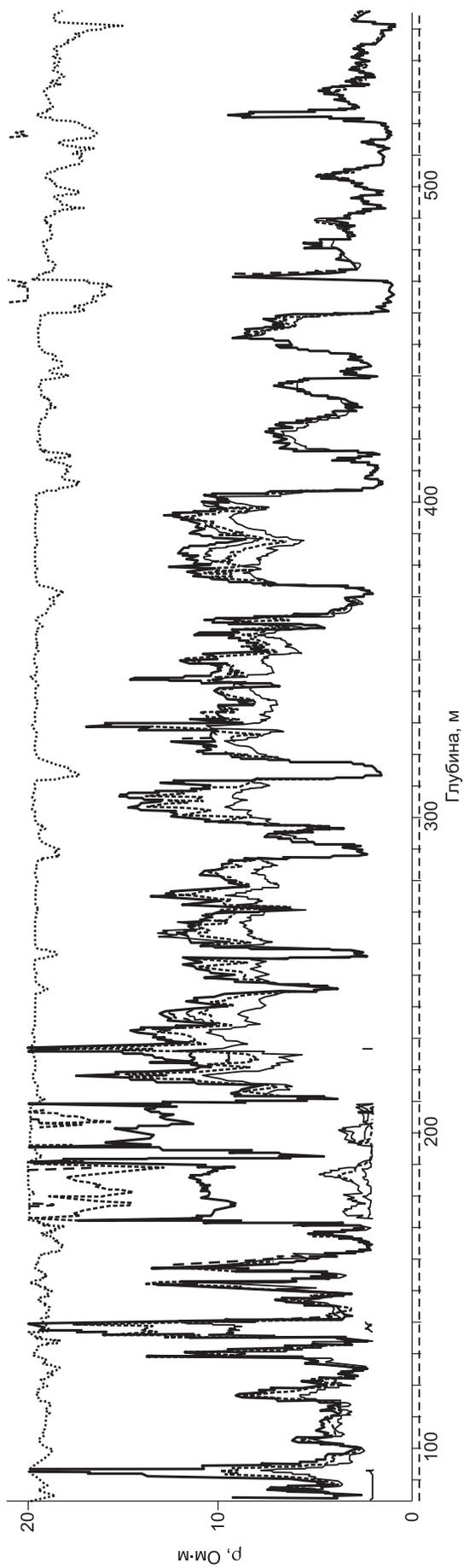


Рис. 2. Каротажная кривая сопротивления, отражающая тонкослоистую структуру геологической среды.

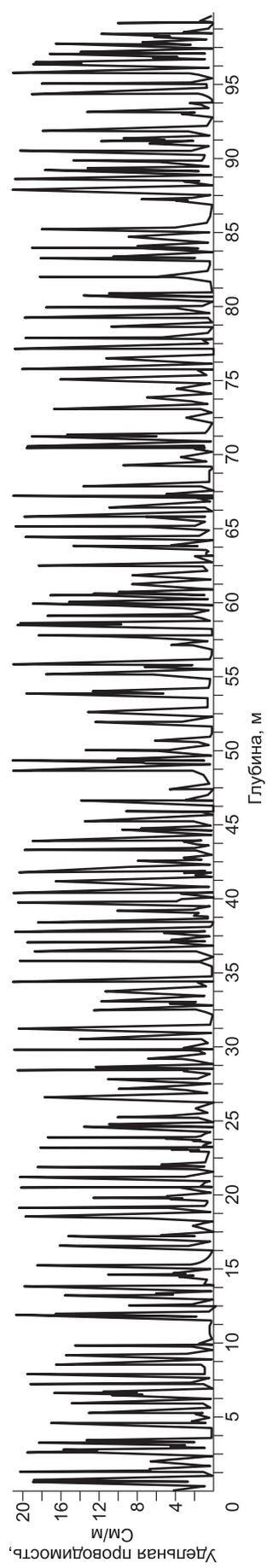


Рис. 3. Пример сформированной случайным образом среды в виде графика продольной удельной проводимости.

взаимодействия электромагнитного поля и среды, т.е. необходимо рассмотреть реакции поля на тонкослойный объект и однородный и сопоставить электромагнитные параметры этих объектов, при которых реакции одинаковы. Далее понятно, что эта эквивалентность зависит от конфигурации электромагнитного поля и его частоты. Например, отсутствие нормальной (к границам проводящих тонких слоев) компоненты электрического поля приводит к появлению только тангенциальных токов, и нас будет интересовать только способность среды пропускать ток в продольном направлении (продольная проводимость). Все многослойные пласты (в том числе однородный) с одинаковой продольной проводимостью будут для нас эквивалентными с разной степенью приближения, хотя поперечные сопротивления могут быть как угодно различны. Эта картина будет зависеть, разумеется, и от частоты электромагнитного поля.

Эта проблема, конечно, возникает в разных сферах применения электромагнитного поля, а не только в геоэлектрике. Для области низких частот, используемых в наземной геоэлектрике, в квазистационарном приближении, для немагнитной среды основополагающими являются результаты работы [Рытов, 1955].

Итак, для продольного и поперечных удельных сопротивлений эквивалентного однородного слоя мощностью H имеем:

$$\rho_l = \frac{H}{S}, \quad \rho_n = \frac{T}{H}, \quad (1)$$

где ρ_l — продольное (тангенциальное, горизонтальное) удельное сопротивление, ρ_n — поперечное (нормальное, вертикальное) удельное сопротивление эквивалентного однородного анизотропного слоя, а

$$S = \sum_{i=1}^N h_i / \rho_i, \quad T = \sum_{i=1}^N h_i \rho_i. \quad (2)$$

Здесь S — суммарная продольная проводимость, а T — суммарное поперечное сопротивление пласта, составленного из N тонких изотропных слоев мощностью h_i и с удельным сопротивлением ρ_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$).

Конечно, геоэлектрики давно и без теории С.М. Рытова на основании практики и прямого моделирования знали об эквивалентности многослойных пластов, имеющих одинаковые значения S и T , так же, как и понимали приближенный, асимптотический характер формул (1) и (2). Сейчас есть возможность на основании численного моделирования оценить возникающие расхождения, связанные с заменой реального тонкослойного пласта, случайным образом сформированного, однородным пластом.

Нами был реализован алгоритм формирования тонкослойной пачки с заданной общей мощностью H , суммарной продольной проводимостью S и суммарным поперечным сопротивлением T . Задача не представлялась сложной и вызвала некоторое затруднение только из-за бесконечного множества возможных решений, из которых все же пришлось выбирать определенным образом. Мы ограничились мощностью тонких слоев всего тремя значениями. Значения сопротивлений определял генератор случайных (псевдослучайных) чисел (процедура из стандартных библиотек программ).

Приведем пример (в визуальной форме) сформированной таким образом из 1000 тонких слоев среды-пласта мощностью 100 м, с продольным сопротивлением 2 Ом·м и поперечным 5 Ом·м. На рис. 3 представлены значения удельных проводимостей (продольных), а график сопротивлений непредставителен из-за отдельных случайных больших значений. Удельные проводимости отдельных прослоев ограничены, поскольку мы приняли минимальное значение удельных сопротивлений как 0.05 Ом·м. На рис. 3, соответственно, максимальные значения удельной проводимости ограничены величиной 20 См/м.

ОРГАНИЗАЦИЯ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Идея численных экспериментов довольно проста. Мы помещаем источники различных типов, работающие в импульсном режиме, на поверхность пласта, сформированного случайным образом из большого (1000) числа тонких слоев разной проводимости, но так, что «рытовские» значения продольного и поперечных удельных сопротивлений равнялись бы заданным. Отклик регистрируем на нижней поверхности (рис. 4), в отличие от практической расстанов-



Рис. 4. Геоэлектрическая схема численных экспериментов.

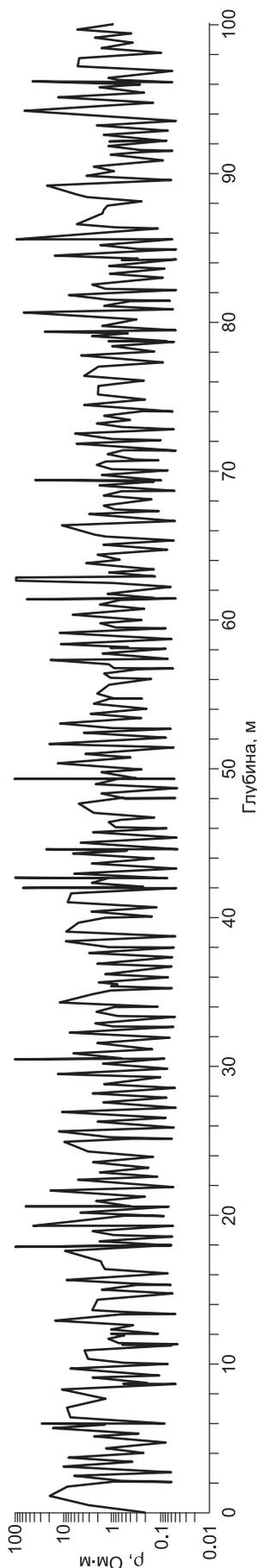


Рис. 5. Среда, давшая расхождение 13 % в ТЕ-эксперименте.

ки на дневной поверхности. Это сделано по двум важным причинам. Первая — мы хотели бы поставить все тонкие слои в равные условия. В практически применяемой расстановке (источник и приемник на дневной поверхности) верхние слои играют в процессе установления много более весомую роль, чем нижние. Вторая причина состоит в том, что разнесение источника и приемника по вертикали облегчает алгоритмическую проблему, связанную с тонкими слоями, и позволяет (очень важно для многократного перебора!) сделать быстрый расчет.

Итак, фиксируем отклик и сравниваем его с запасенным откликом однородного слоя с теми же суммарными значениями мощности, продольной проводимости и поперечного сопротивления. Если отклонение более значительно, чем зафиксированное ранее, то оно становится очередным показателем, а цикл (новая среда—расчет—сравнение) продолжается далее до бесконечности, выявляя среды, дающие все большее отклонение отклика от однородной среды. Выявив интересную среду, мы теперь можем испытать ее и с обычной электроразведочной установкой, что будет продемонстрировано ниже.

Далее необходимо решить, какие источники и приемники использовать. Ограничиться одной приемно-питающей установкой — значило бы резко ограничить значение нашего эксперимента. Но и все комбинации перебирать невозможно. У нас есть принципиальный подход, согласно которому необходимо испытать три приемно-питающие установки, фиксирующие сигналы, относящиеся к ТЕ-поляризации электромагнитного поля, к ТМ и наиболее употребляемой комбинации ТЕ + ТМ. Таким образом, здесь мы используем следующие приемно-питающие установки.

Источник — горизонтальная электрическая линия (ГЭЛ 10 м длиной с током 1 А), измеряемая компонента dB/dt на экваторе диполя (разнос 100 м). Хотя ГЭЛ — источник, возбуждающий поля обеих поляризаций (ТЕ и ТМ), но эта компонента принадлежит только ТЕ-полю (или полю магнитного типа).

Источник — круговой электрический диполь (КЭД, радиус 10 м и ток 1 А), измеряемая компонента E_r (разнос 100 м). Это, конечно, чистая ТМ-поляризация (или поле электрического типа).

Источник — ГЭЛ (10 м длиной с током 1 А), но измеряется компонента E_x на оси диполя (разнос 100 м). Эта установка, как известно, традиционна и популярна и фиксирует сигнал, принадлежащий двум поляризациям (ТМ + ТЕ).

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ДЛЯ РАСЧЕТА ОТКЛИКА ОТ МНОГОСЛОЙНЫХ СРЕД

Математический аппарат для расчета устанавливающего электромагнитного поля хорошо известен, особенно, в варианте решение в частотной области с последующей трансформацией, например [Ваньян, 1965; Дмитриев, 1968; Могилатов, 2002], а в лаборатории геоэлектрики ИНГГ СО РАН поддерживаются давние традиции компьютерной реализации этого аппарата для разных источников поля. Нами также развивалось направление, предложенное А.Н. Тихоновым, О.А. Скугаревской [1950], известное еще как решение во временной области или метод устанавливающихся гармоник. Новое обстоятельство возникает в связи с большим количеством слоев (до 1000). Необходимо было проверить и усилить алгоритмы рекурсивного расчета подынтегральной (одномерной) функции, исследовать устойчивость этих алгоритмов в случае очень длинных рекурсий.

Анализ показал, что рекурсии магнитного типа весьма устойчивы, а рекурсии электрического типа имеют некоторые проблемы, что связано с переходами границ, где есть разрывы (в отличие от рекур-

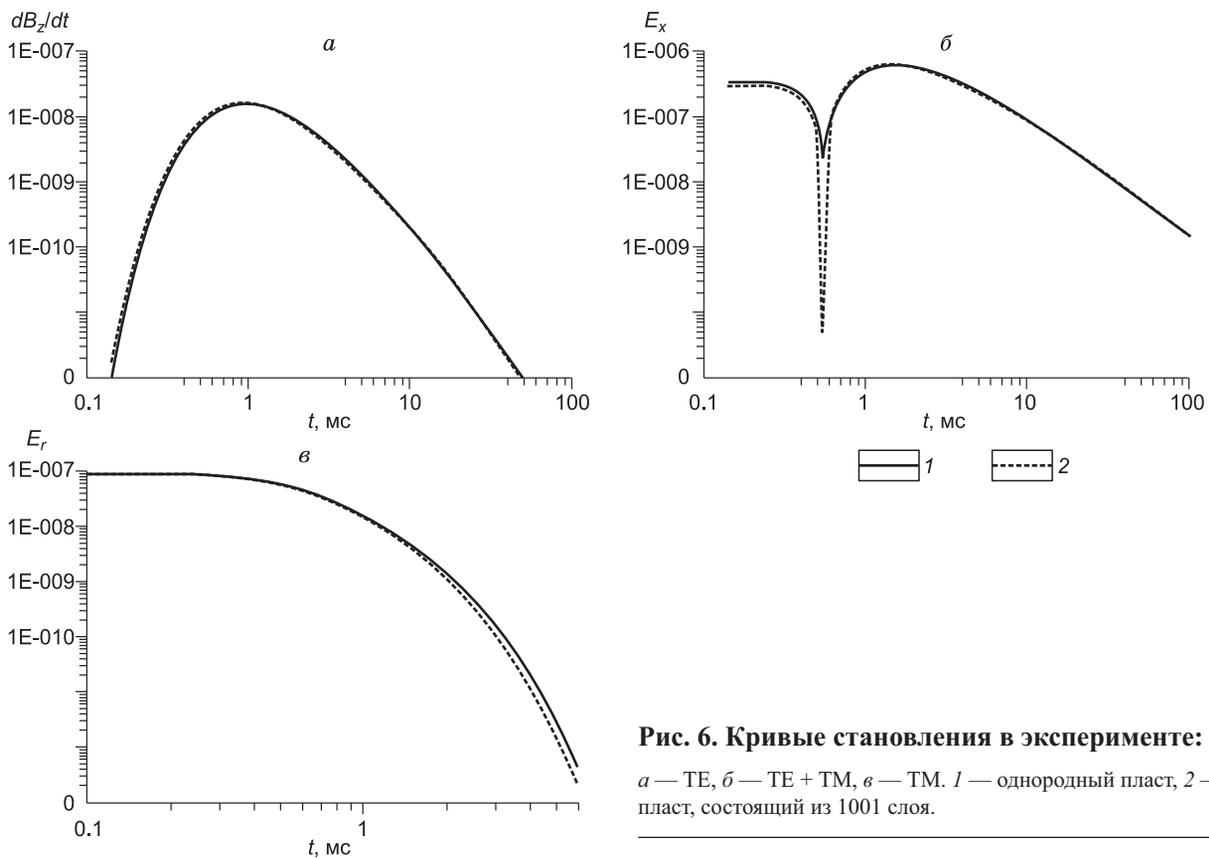


Рис. 6. Кривые становления в эксперименте:
a — TE, *б* — TE + TM, *в* — TM. 1 — однородный пласт, 2 — пласт, состоящий из 1001 слоя.

сий магнитного типа). Тем не менее некоторая модификация позволила достаточно устойчиво рассчитывать длинные рекурсии обоих типов. Проблема сходимости интегралов Ханкеля сильно облегчалась (как мы уже говорили) расположением источника и приемника на разных сторонах пачки-пласта.

Тестирование состояло, во-первых, в прогонках процедуры рекурсии вверх и вниз по среде (значения функции и ее производной не должны измениться), во-вторых, в расчете для псевдослоистой среды с большим (~ 1000) числом фиктивных границ. Кроме того, результаты сравнивались с расчетами по совершенно другому алгоритму, основанному на решении А.Н. Тихонова.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты пока имеют предварительный характер. Мы запускали все три программы (для каждой из установок) на несколько суток каждую. Эксперимент был прерван для анализа получающихся результатов и соответствующей коррекции всего опыта в целом. Надо заметить, эквивалентность по С.М. Рытову работает очень хорошо — уже после первых суток мы практически перестали получать отклики, отклонения которых от отклика однородной среды (эквивалентного по С.М. Рытову пласта) нужно было бы фиксировать как максимальные.

Наши результаты свелись к следующему.

Для установки ГЭЛ— dB_z/dt (чистое TE-поле) мы получили расхождение с однородным пластом ($H = 100$ м, $S = 50$ См) в среднеквадратичном смысле 13 %. На рис. 5 представлена тонкослоистая среда, суммарные мощность и проводимость которой, конечно, такие же, и она ответственна за это расхождение. На графике значения сопротивлений даны в логарифмическом масштабе.

Ничего интересного визуально не просматривается. Мы будем анализировать эту среду ниже. На рис. 6, *a* приведена кривая становления в сравнении с кривой для однородного слоя, расхождение 13 %.

Для установки ГЭЛ— E_x (TE + TM) достигнуто 21 % (см. рис. 6, *б*).

Наконец, для установки КЭД— E_r (TM) мы получили 33 % (см. рис. 6, *в*).

Теперь встает вопрос, как относиться к этим результатам. Наверное, преждевременно объявлять полученные величины непосредственно относящимися к точности модельных построений и к точности метода ЗС вообще. Проследим за распределением продольной проводимости внутри синтезированных тонкослоистых пластов. На рис. 7 представлены графики изменения (прироста) суммарной продольной

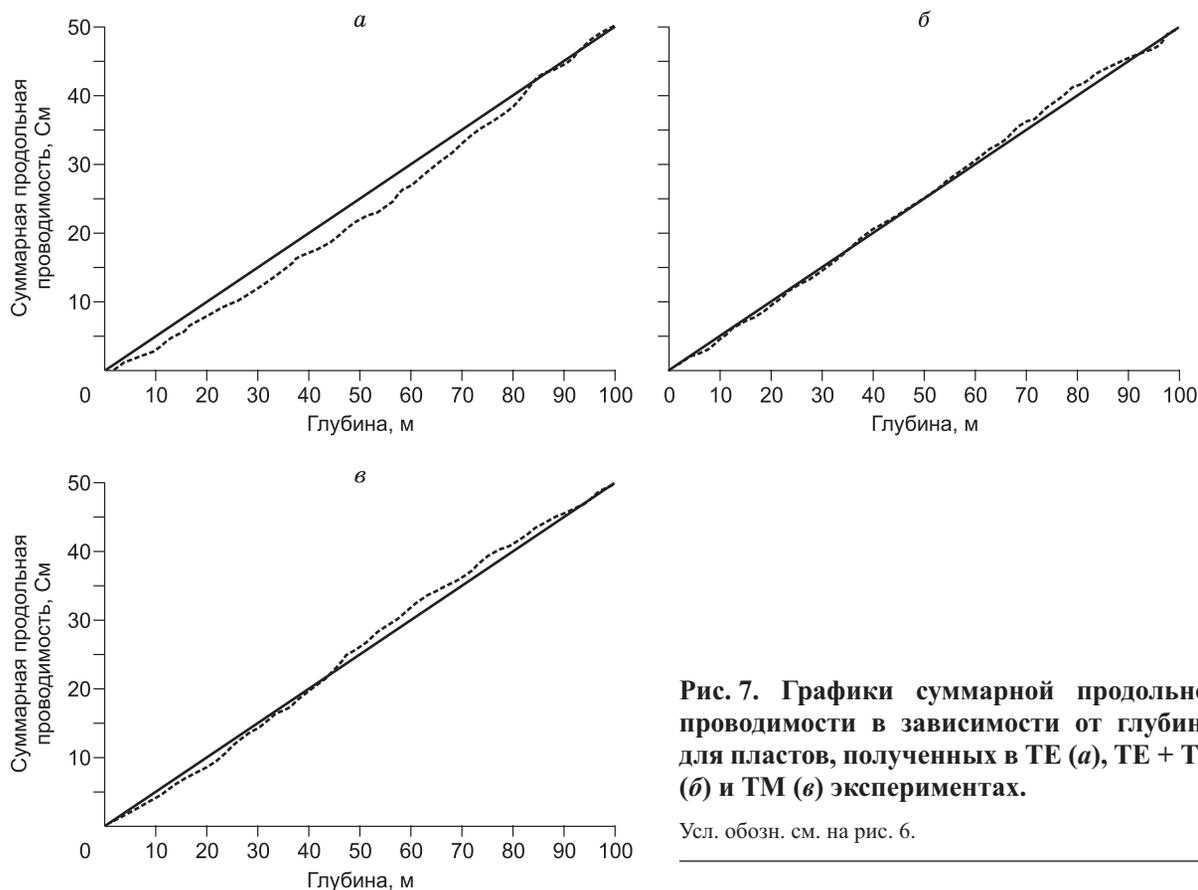


Рис. 7. Графики суммарной продольной проводимости в зависимости от глубины для пластов, полученных в ТЕ (а), ТЕ + ТМ (б) и ТМ (в) экспериментах.

Усл. обозн. см. на рис. 6.

проводимости с глубиной для всех трех сред-пластов, ответственных за аномальный отклик с трех типов установок.

Прямыми линиями показан соответствующий график для однородного пласта. Видно, что в случае ТЕ (см. рис. 7, а) произошло (случайным образом) перераспределение проводимости. Она избыточна в нижней части слоя, в то время как в верхней части пласта ее не хватает. Для ТЕ + ТМ и ТМ (см. рис. 7, б, в) эта ситуация не так очевидна.

Проанализируем ситуацию с практической электроразведочной стороны. Для полученной среды (в ТЕ-эксперименте) рассчитаем синтетическую кривую становления для обычной установки ЗСБ с соосными петлями (генератор 80×80 м, приемник 1×1 м с эффективным моментом 1000 м^2 , ток 1 А). Для преодоления плохой сходимости интеграла Ханкеля (источник и приемник теперь на дневной поверхности) мы использовали метод деформации пути интегрирования в комплексной плоскости (в этом случае время расчета нас не волновало). Произведем теперь стандартную слоистую интерпретацию (в качестве независимого эксперта это сделал А.К. Захаркин). В результате получена следующая модель:

№ слоя	УЭС, Ом · м	Мощность, м
1	3.73	6.93
2	2.16	49.6
3	1.79	47.4
4	∞	∞

На рис. 8, а представлены кривые кажущегося сопротивления для установки ЗСБ. Мы видим хорошо совпадающие полевую (1001 слой) и подобранную 4-слойную кривые, а также кривую для однородного эквивалентного ($\rho = 2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $H = 100 \text{ м}$) слоя.

Проблема вроде бы разрешилась тривиальным и удовлетворительным образом. Электроразведка ЗСБ «видит» этот слой как состоящий из трех отдельных слоев.

Однако, если представить этот слой в составе слоистой среды большей мощности ($\sim 1 \text{ км}$), исследуемой в процессе обычной практики ЗСБ, то, скорее всего, этот пласт все-таки будет рассматриваться как однородный.

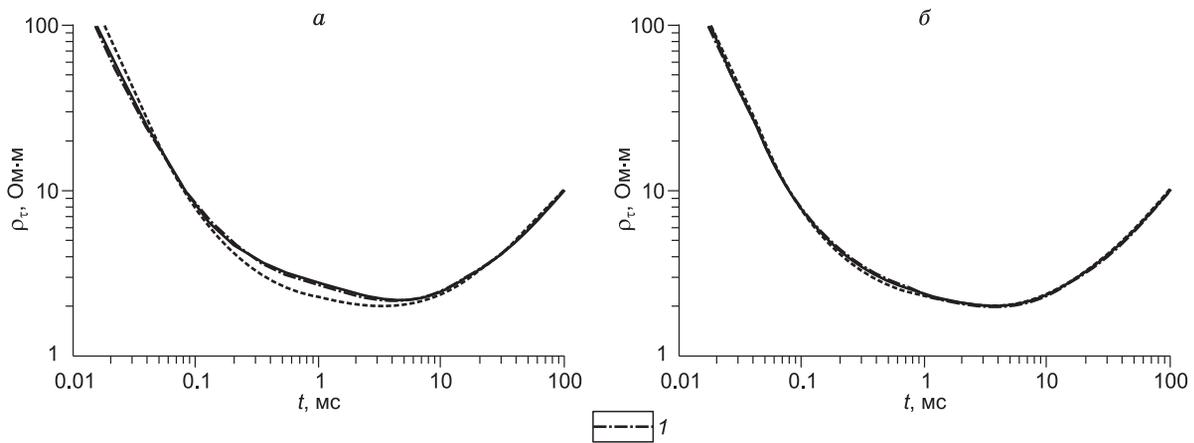


Рис. 8. Кривые кажущегося сопротивления.

a, б — пояснение см. в тексте. *1* — пласт, состоящий из четырех слоев. Остальные усл. обозн. см. на рис. 6.

Еще большая условность модельных представлений демонстрируется на примере среды, полученной в ходе ТМ-эксперимента. Среда, которая в ТМ-поле дает до 33 % отклонения от «рытовского» эквивалента, с точки зрения ЗСБ, практически неотличима от однородного эквивалента (см. рис. 8, б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эти результаты хотелось бы считать весьма предварительными. Мы начинали эту работу давно, под впечатлением довольно частых сообщений о высокоразрешающих феноменах, регистрируемых в поле. Более того, высокоразрешающая электроразведка уже как бы введена в реестр методов — есть высокоразрешающая электроразведка, а есть и обычная. Между тем объяснения высокоразрешающих эффектов приводятся совершенно разного рода. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод, что правильного объяснения пока нет. Конечно, страшный враг всякого рода тонкостей — диффузный характер распространения нашего (в структурной электроразведке) поля. Диффузно оно распространяется вниз от источника и диффузным же образом передает наверх всякий тонкий глубинный аномальный эффект, если он возникнет. И что же останется от него на дневной поверхности, где мы регистрируем отклик? Тем не менее хотелось бы внести свой вклад, исследовав влияние модельного несоответствия, а также надеясь «поймать» в численных экспериментах с очень сложными (но одномерными) средами эффекты, ускользнувшие от теоретиков, может быть, резонансного характера. Пока что мы увидели только условность модельных представлений и некоторую неопределенность результатов электроразведки. Однако наш численный эксперимент пока имеет очень скромные масштабы и его необходимо продолжить. Кроме того, легко объяснимые результаты, которые мы пока получили, вполне возможно, определены тем, что пришлось проигнорировать распределение магнитной проницаемости тонких слоев, а также и диэлектрической (мы пренебрегали токами смещения). Эти параметры также «на всякий случай» следовало бы положить в нашу «ловушку».

ЛИТЕРАТУРА

- Ваньян Л.Л.** Основы электромагнитных зондирований. М., Недра, 1965, 109 с.
- Дмитриев В.И.** Общий метод расчета электромагнитного поля в слоистой среде // Вычислительные методы и программирование, 1968, вып. 10, с. 55—65.
- Могилатов В.С.** Импульсная электроразведка. Новосибирск, НГУ, 2002, 208 с.
- Рытов С.М.** Электромагнитные свойства мелкослоистой среды // Журнал экспериментальной и теоретической физики, 1955, т. 29, № 5, с. 605—616.
- Тихонов А.Н., Скугаревская О.А.** О становлении электрического тока в неоднородной среде. II // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геоф., 1950, т. XIV, № 4, с. 281—293.

Рекомендована к печати 31 мая 2011 г.

М.И. Эповым

Поступила в редакцию

24 ноября 2010 г.