

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ИНДУКЦИОННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ С УЧЕТОМ ИНДУКЦИОННО-ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Е.Ю. Антонов¹, Н.О. Кожевников^{1,2}, М.А. Корсаков¹

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

Разработан программно-алгоритмический комплекс для моделирования и интерпретации данных индукционных импульсных электромагнитных зондирований с учетом индукционно-вызванной поляризации (ВПИ). Обоснована методика поэтапной интерпретации данных индукционных импульсных электромагнитных зондирований поляризующихся сред. Программный комплекс и методика интерпретации показали высокую эффективность при поисках таликовых зон в районе Пякяхинского нефтегазового месторождения и нефтепоисковых работах на юге Сибирской платформы.

Индукционно-вызванная поляризация, совместная инверсия, импульсная электроразведка, мерзлота.

SOFTWARE FOR INVERSION OF TEM DATA AFFECTED BY FAST-DECAYING INDUCED POLARIZATION

E.Yu. Antonov, N.O. Kozhevnikov, and M.A. Korsakov

The paper presents new software and stepwise modeling techniques for inversion of TEM data affected by fast-decaying induced polarization (IP). The software and the methods have demonstrated high efficiency when applied to detection of unfrozen ground zones (taliks) in the Pyakyakhinka oilfield and to petroleum exploration in the southern Siberian craton.

Induced polarization, joint inversion, TEM surveys, permafrost

ВВЕДЕНИЕ

Первые автоматизированные системы интерпретации данных методов импульсной электроразведки появились в конце 80-х годов прошлого века. Наиболее известные из них: GRENDL [McAllister, Raiche, 1986], TEMIX [Stoyer, 1988], ЭРА [Табаровский и др., 1989; Табаровский, Эпов, 1990; Эпов и др., 1990] и ПОДБОР [Могилатов и др., 2007]. В связи с внедрением персональных компьютеров эти системы получили широкое распространение и в течение многих лет служат рабочими инструментами в геофизических исследованиях. Упомянутые отечественные и зарубежные программные комплексы предназначены для инверсии данных зондирований становлением поля в рамках модели горизонтально-однородной проводящей среды.

К настоящему времени в России и за рубежом разработано несколько программных пакетов, предназначенных для интерпретации данных наземных импульсных электромагнитных зондирований. Наиболее известными из них являются следующие.

EMS (ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск) — современная версия программы МФС ЭРА+ [Табаровский и др., 1989; Эпов и др., 1990] для интерпретации данных площадных импульсных индукционных зондирований [Хабинов и др., 2010]. В новой версии существенно развит пользовательский интерфейс и графическая визуализация данных и результатов интерпретации. Инверсия данных выполняется в рамках модели слоистой проводящей среды. Прямая задача для индукционной установки реализуется методом аппроксимации горизонтально-слоистой среды системой S-пленок Прайса—Шейнмана [Табаровский, Эпов, 1990].

ПОДБОР (СНИИГГиМС, ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск). Данная система [Могилатов и др., 2007] кроме решения в частотной области использует быстрый алгоритм решения прямой задачи импульсной индукционной электроразведки во временной области А.Н. Тихонова [Тихонов, Скугаревская, 1950]. Система реализует четыре метода инверсии: Левенберга—Марквардта, Ньютона, линейной

инверсии (локальный ряд Тейлора), минимизации с использованием линеаризованной прямой задачи. Система ПОДБОР снабжена весьма развитым и отлаженным сервисным математическим обеспечением.

EM Vision (Encom, Австралия) — программа интерпретации данных электромагнитных зондирований с учетом эффектов индукционно-вызванной поляризации (ВПИ). Интерфейс программы позволяет обрабатывать результаты измерений, представленных в форматах аппаратуры электромагнитных зондирований (Artemis, Geonics, Sirotem, Zonge Engineering, Airborne GEOTEM и др.) (web2.encom.com.au/pages/swev_sp.htm).

EMIGMA (PetRos EiKon Incorporated, Канада). В программном комплексе реализован набор функций, основными из которых являются обработка данных как аэро-, так и наземных импульсных электромагнитных зондирований установками с совмещенными или разнесенными петлями. Инверсия данных осуществляется с помощью алгоритмов Оккама и Марквардта в рамках горизонтально-слоистой модели среды. Кроме этого, программный комплекс содержит пакет для моделирования электромагнитных полей в трехмерных средах. Большим достоинством комплекса является графический интерфейс, сопоставимый по уровню со специализированными системами визуализации данных (www.petroseikon.com/emigma/77ps/tem.php).

TEM-RESEARCHER (Applied ElectroMagnetic Research (AEMR), Голландия). Программный продукт входит в многоцелевую геофизическую систему TEM-FAST 48НРС. С помощью этой программы можно проводить инверсию данных в рамках горизонтально-слоистых и градиентных моделей. Предусмотрена возможность моделирования с учетом ВПИ и магнитной вязкости. Для визуализации результатов инверсии строятся 2D- и/или 3D-изображения геоэлектрических разрезов. Реализован алгоритм совместной инверсии данных ЗСБ и ВЭЗ [Barsukov et al., 2007].

STEMINV (Zonge International Inc., США) — система интерпретации данных многокомпонентных электромагнитных зондирований, ориентированная на аппаратуру фирмы Zonge. Обработка данных нестационарных электромагнитных зондирований (НЭМЗ) осуществляется двумя модулями: TEM1D — для моделирования электромагнитных откликов индукционной петлевой системы; TCINV — для инверсии данных используются итерационные алгоритмы линейной минимизации в рамках горизонтально-слоистой модели среды (www.zonge.com/ModelTEM.html).

SiTEM/SeMDI (Aarhus Geophysics, Дания). Состоит из двух программных пакетов, предназначенных для обработки (SiTEM) и инверсии (SeMDI) данных НЭМЗ. Дополнительно SeMDI можно использовать для инверсии данных метода сопротивлений. В программе реализована совместная инверсия данных НЭМЗ и ВЭЗ (www.aarhusgeo.com/Overview/products-overview.html).

Выше перечислены наиболее известные программные системы для инверсии данных НЭМЗ. При разработке этого программного обеспечения (ПО) были определены основные принципы построения интерфейса и архитектуры интерпретационных компьютерных систем. Эти принципы используются при разработке нового ПО для обработки и интерпретации электроразведочных данных. Анализ рассмотренных выше систем позволил сделать выводы о наметившихся тенденциях дальнейшего развития интерпретационных систем и сформулировать требования к разрабатываемому авторами программному пакету.

В числе требований к современным интерпретационным системам следует особо отметить необходимость инверсии индукционных переходных характеристик с учетом индукционно-вызванной поляризации. Потребность в разработке таких систем прямо или косвенно затрагивается во многих работах, например, в известной статье Б.С. Светова и В.В. Агеева [1999].

С начала 70-х годов прошлого века в публикациях о результатах съемок индукционным методом переходных процессов (МПП) все чаще появляются сообщения о регистрации немонотонных — вплоть до смены полярности — неустановившихся сигналов. Как выяснилось, причиной появления таких сигналов является ВПИ геологической среды. Явление вызванной электрической поляризации (ВП) давно используется при решении геологических задач. Наиболее полно изучена и широко применяется вызванная поляризация, измеряемая при помощи заземленных электрических линий для возбуждения и приема поля. Для такого типа ВП характерны большие времена релаксации, поэтому зачастую влиянием индукционных процессов удается пренебречь. Что касается быстропотекающей вызванной поляризации, проявляющейся при индукционном возбуждении и регистрации переходных процессов, то данное явление обычно рассматривается как геологическая помеха. Это обусловлено как слабой изученностью самих процессов ВПИ, так и тем, что на ранних временах преобладают индукционные эффекты. Вместе с тем показано, что совместная инверсия результатов индукционных зондирований (для установок разной геометрии и/или размера) с учетом частотной дисперсии электропроводности позволяет оценивать параметры ВПИ даже в условиях сильного проявления индукционных эффектов [Кожевников, Антонов, 2007, 2009а,б; Kozhevnikov, Antonov, 2008]. Это послужило основанием для дальнейшего развития первой версии научно-исследовательской программно-алгоритмической систе-

мы, обеспечивающей интерпретацию данных импульсных индукционных зондирований [Антонов и др., 2010, 2011; Кожевников и др., 2012].

Нами развиваются собственные подходы и программы для интерпретации данных импульсной электроразведки, в том числе с учетом ВПИ. Одной из первых таких программ является Inv_QQ_IP (авторы Е.Ю. Антонов, В.В. Потапов, ИНГГ СО РАН), написанная в 2005—2007 гг. в среде разработки ПО Delphi. Эта программа нашла широкое применение при интерпретации данных МПП, полученных при поисках кимберлитовых тел в Якутии [Стогний, Коротков, 2010]. Результаты этих и ряда последующих работ были учтены при разработке интерпретационной системы TEM-IP, описанной в настоящей статье.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОГРАММЫ TEM-IP

Система TEM-IP представляет комплекс программ для решения разнообразных задач интерпретации данных импульсной электроразведки. В комплекс входят программы моделирования (прямые задачи), точечной и/или совместной инверсии данных (обратные задачи), а также процедуры импорта/экспорта и графической визуализации данных.

Пользовательский интерфейс. Главное окно системы представлено в виде многодокументного интерфейса. Каждый документ отображается в отдельном окне и является самостоятельным модулем системы. Окна документов обладают всеми свойствами «плавающего» окна. По умолчанию они находятся в полноэкранный режиме, занимают все свободное пространство главного окна и переключаются выделением вкладок на верхней панели. Модули панелей служат для визуализации и работы с объектами входных и выходных данных программы. В системе предусмотрены два типа документов и пять типов панелей.

В верхней части главного окна (рис. 1) есть панели меню, инструментов и вкладок, в нижней части — строка состояния. Слева расположена оконная панель <Проект>. Три другие панели (<Графика>, <Модель> и <Установка>) принадлежат окну документа интерпретации и находятся справа. Расположение компонент интерфейса не является фиксированным, их можно перемещать в пределах главного окна, настраивая его вид по желанию пользователя.

Для научно-исследовательской версии системы интерпретации важна возможность импорта и экспорта данных в форматах, используемых в разных типах измерительной аппаратуры и/или других программных системах интерпретации. В настоящее время в программе реализован импорт данных, имеющих форматы, которые используются в разных типах измерительной аппаратуры, таких как SGS-TEM, FASTSNAP, ЦИКЛ, TEM-FAST. Архитектура системы позволяет расширять возможности импорта данных по мере необходимости.

В последние годы в результате электроразведочных работ получают массивы данных все большего объема, что делает актуальной разработку интерфейса для 2D- и 3D-визуализации сигналов становления и трансформаций в виде кажущегося сопротивления $\rho_t(t)$ или продольной проводимости $S_t(H_t)$, а также экспорта данных и результатов инверсии в виде, удобном для использования в специализированных графических программах — на усмотрение пользователя.

Разработан графический интерфейс, позволяющий редактировать данные, а также осуществлять с графиками арифметические операции, осреднение и инверсию графиков. Система может выполнять пересчет переходных характеристик в частотную область, что может быть использовано для оперативного анализа спектра сигнала становления и/или подготовки массивов данных для 2D- или 3D-инверсии. Это обусловлено тем, что решения многомерных задач имеют большее быстроедействие именно в частотной области, а независимость решения на выделенных частотах позволяет применять параллельные вычисления.

Программный комплекс является проектно-ориентированным, т.е. позволяет объединять первичные данные электромагнитных зондирований (профильные или площадные) в именованный проект для последующего их структурирования, быстрого доступа и работы с каждым объектом данных отдельно. Для выделенных данных имеется возможность по результатам инверсии строить геоэлектрические разрезы (рис. 2), временные разрезы ЭДС, а также кажущегося сопротивления и/или продольной проводимости.

В системе разработан и используется собственный внутренний формат для сохранения экспериментальных данных, характеристик аппаратуры и параметров моделей среды. Файл имеет заголовок, содержащий паспорт зондирования и параметры установки, данные (время регистрации, ЭДС, относительную ошибку измерения) и модель, при сохранении протокола результатов инверсии.

Для этих целей в программе реализованы возможности предварительной обработки и редактирования экспериментальных данных (как в табличном, так и графическом виде). В программе реализовано создание протокола (истории) моделей среды, полученных в процессе инверсии, и сохранение их в файл

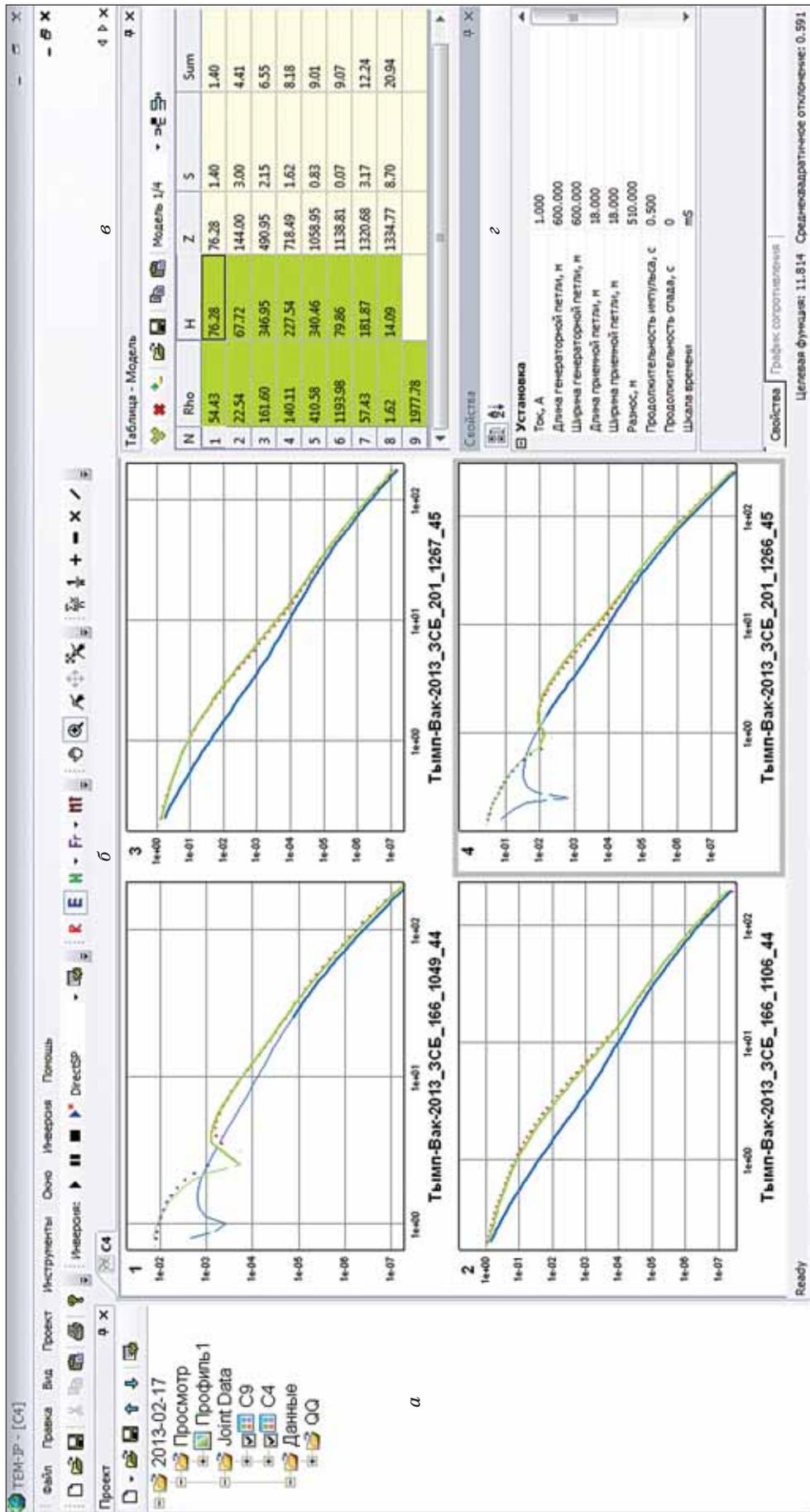


Рис. 1. Основное рабочее окно программы TEM-IP.

α — панель данных <Проект>, β — графическое окно <Графика>, ϵ — модель <Модель>, ζ — параметры генераторно-приемных установок <Свойства>.

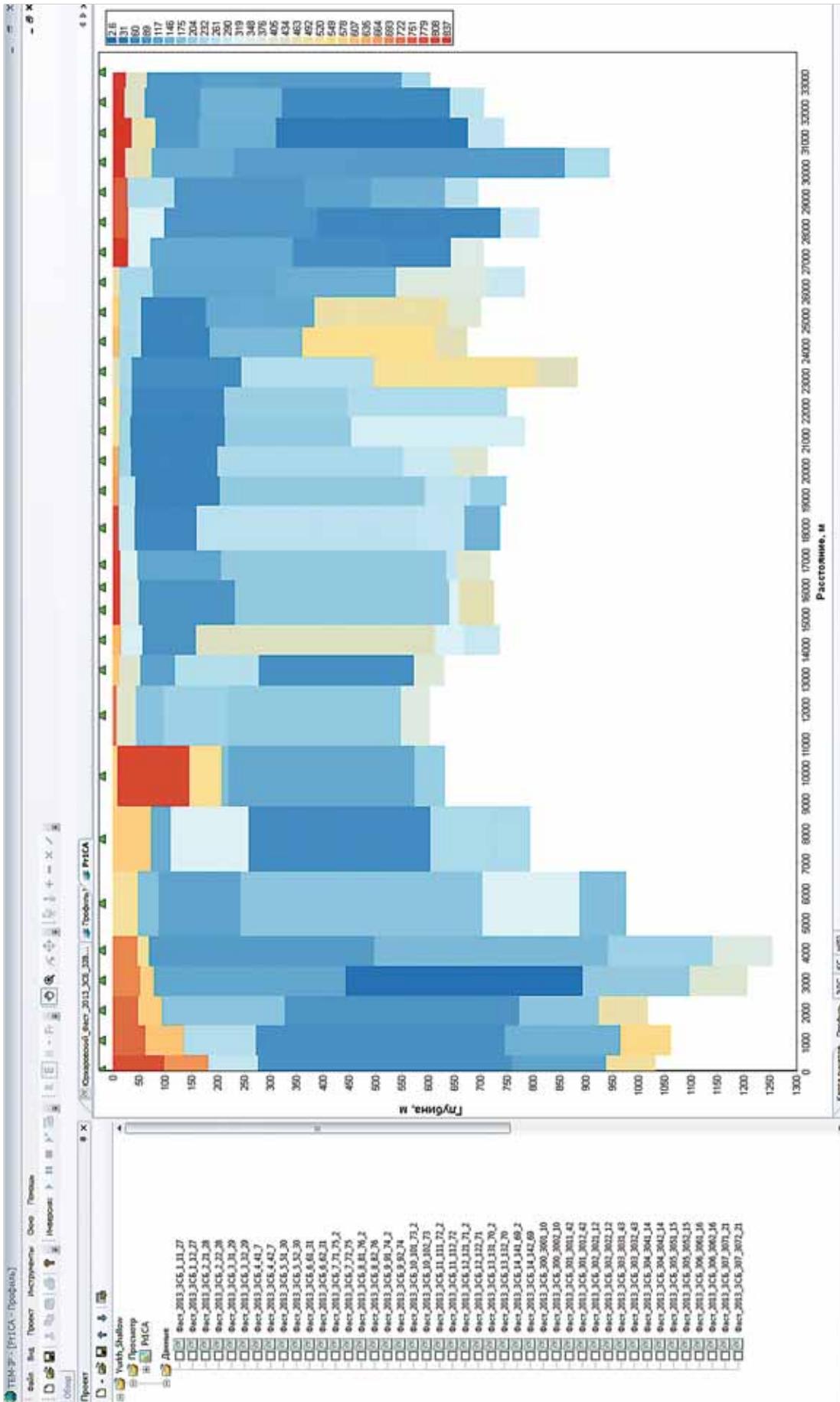


Рис. 2. Результаты поточечной инверсии данных, представленные в виде геоэлектрического разреза.

Рис. 3. Графики ускорения вычислений (отношение времен расчета t_p на p -процессорах ко времени вычислений на одном процессоре (t_1)) в зависимости от количества используемых процессоров:

1 — НКС-160, 2 — НКС-30Т.

со специальным форматом *.mdstore. Также был создан файл для хранения используемых в проекте интегральных квадратур преобразования Ханкеля с целью оптимизации расчета прямых задач. Разработана универсальная опция экспорт профильных данных в форматы, поддерживаемые графическими системами Surfer и Voxler (Golden Software).

Решение прямой задачи. Вычислительное ядро программного комплекса составляет решение прямой задачи для индукционной установки на поверхности слоистого проводящего поляризуемого полупространства. Решение обратной задачи основано на оптимальном переборе решений прямой задачи в заданном пространстве параметров, поэтому одним из основных требований к процедурам прямой задачи является скорость расчета. В системе предусмотрены: ускорение вычислений за счет использования разных алгоритмических подходов в зависимости от постановки («обычная» проводящая или поляризуемая среда); набор процедур для прямых задач с разной вычислительной скоростью и точностью, а также возможность простого переключения между ними; использование при вычислениях распараллеливания алгоритмов.

В данной версии интерпретационной системы применяются два алгоритма для решения прямой задачи. В случае неполяризующихся сред используется быстрый алгоритм вычисления вихревой моды поля с аппроксимацией горизонтально-слоистой среды системой S -пленок [Табаровский, Эпов, 1990]. Вычислительную схему второго решения — методом Фурье (с учетом ВП) — обеспечивают алгоритмы: вычисления фундаментальной функции слоистой задачи; интегрирования по пространственной частоте (интегральное преобразование Ханкеля); \sin - и \cos -преобразования Фурье из частотной во временную область. Эти алгоритмы подробно описаны в публикациях [Табаровский, 1979; Табаровский, Соколов, 1982]. Описание решения задач для слоистых поляризующихся сред можно найти в работах [Эпов, Антонов, 1999, 2000]. Решение прямых задач для установок «петля-петля» и «петля-линия» выполняется модулями Unv_QQ и QLineIP [Кожевников, Антонов, 2007, 2009а,б; Kozhevnikov, Antonov, 2008]. Алгоритм прямой задачи, решаемый методом Фурье, содержит несколько ресурсоемких циклов (до 99.5 % расчетного времени), которые были распараллелены. В результате удалось добиться ускорения вычислений практически пропорционального количеству используемых процессоров (рис. 3). Испытания алгоритма выполнялись как на многоядерных персональных компьютерах, так и на многопроцессорных кластерах типа НКС-160, НКС-30Т (www2.sccc.ru).

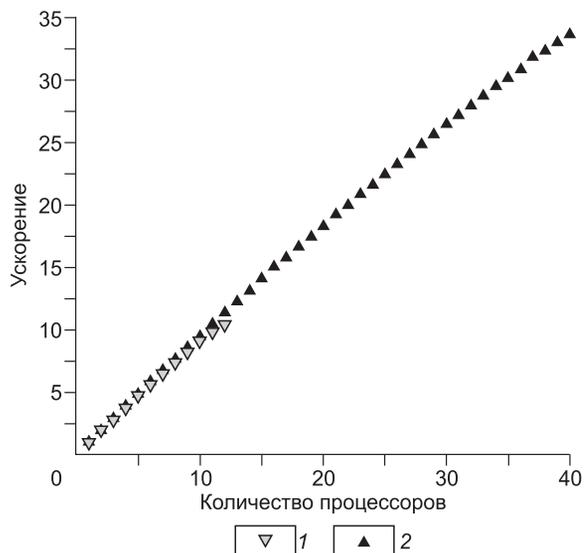
Учет индукционно-вызванной поляризации при решении прямой задачи осуществляется путем использования комплексной удельной электропроводности, зависящей от частоты. Наиболее известным и часто применяемым представлением частотной характеристики вызванной поляризации геологических сред является формула Коул—Коула [Cole, Cole, 1941]. Для комплексной удельной электропроводности [Lee, 1981] она имеет вид:

$$\sigma^*(\omega) = \sigma_0 \frac{1 + (i\omega\tau)^c}{1 + (1 - \eta)(i\omega\tau)^c},$$

где $j = \sqrt{-1}$, σ_0 — удельная электропроводность на постоянном токе (См/м); η — поляризуемость ($0 \leq \eta \leq 1$), τ — время релаксации (с); c — показатель степени ($0 < c \leq 1$). Таким образом, модель n -слойной проводящей поляризующейся среды полностью описывается вектором параметров следующего вида:

$$\mathbf{M} = (\rho_1, \dots, \rho_n, h_1, \dots, h_{n-1}, \eta_1, \dots, \eta_n, \tau_1, \dots, \tau_n, c_1, \dots, c_n).$$

Решение обратной задачи обычно ищется либо для полного набора параметров среды \mathbf{M} , либо на каком-то его подмножестве $\mathbf{P} \subseteq \mathbf{M}$.



Решение обратной задачи. Параметры геоэлектрического разреза при решении обратной задачи находятся путем минимизации следующих функционалов (по выбору интерпретатора):

1) взвешенного модуля относительного отклонения экспериментальных и модельных данных:

$$\Phi_1(\mathbf{P}, N) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{f^e(t_i) - f^t(\mathbf{P}, t_i)}{\delta(t_i) f^e(t_i)} \right|; \quad (1)$$

2) взвешенного среднеквадратичного отклонения экспериментальных и модельных данных:

$$\Phi_2(\mathbf{P}, N) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{f^e(t_i) - f^t(\mathbf{P}, t_i)}{\delta(t_i) f^e(t_i)} \right)^2}, \quad (2)$$

где \mathbf{P} — вектор из пространства модельных параметров, $\{t_i, i=1, \dots, N\}$ — времена измерения переходной характеристики, $f^e(t)$ — экспериментальные данные, $f^t(\mathbf{P}, t)$ — модельный сигнал, δ — относительная ошибка измерений;

3) при выполнении совместной инверсии минимизируется более сложный функционал в виде взвешенной суммы функционалов (1) или (2), куда входят данные нескольких измерительных установок, для которых ищется единая модель:

$$\Phi_3(\mathbf{P}, N) = \sum_{\alpha=1}^L \beta_{\alpha} \Phi_{\alpha}(\mathbf{P}, N_{\alpha}), \quad N = \sum_{\alpha=1}^L N_{\alpha}, \quad \sum_{\alpha=1}^L \beta_{\alpha} = 1.$$

Здесь L — количество установок, Φ_{α} — функционал вида (1) или (2) для измерительной установки с индексом α , β_{α} — весовые коэффициенты, позволяющие интерпретатору регулировать вклады отдельных измерений в зависимости от их объема, качества или с учетом априорной информации. Минимизация выполняется путем оптимального перебора параметров модели \mathbf{P} с помощью модифицированного метода Нелдера—Мида [Nelder, Mead, 1965].

Процесс интерпретации сложный и нередко многоэтапный. Даже в случае неполяризуемой среды иногда приходится выполнять процедуру инверсии несколько раз, изменяя стартовую модель. В случае поляризуемой среды это почти всегда многоэтапная процедура. На начальном этапе в программу вводят модельные данные (удельное электрическое сопротивление и мощности слоев), параметры установки (размеры генераторных и измерительных петель), характеристики аппаратуры (сила тока, продолжительность зондирующего импульса и линейного спада после выключения), а также таких параметров обратной задачи, как минимальное значение целевой функции, количество итераций и др. При решении обратной задачи выполняется перебор физических параметров среды, расчет прямой задачи, вывод экспериментальных и модельных графиков ЭДС или кажущегося сопротивления. Для интерактивного контроля пользователем процесса решения производится пошаговое отображение промежуточных результатов итерационного процесса на экран.

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММЫ ТЕМ-IP

Ниже приведены примеры использования программы ТЕМ-IP для двух разных геолого-геофизических задач в режиме поточечной и совместной интерпретации данных индукционных импульсных электромагнитных зондирований с учетом ВПИ.

Поиски таликовых зон в районе Пяяхинского месторождения. Нередко основным источником водоснабжения в северных районах являются водонасыщенные талые породы среди мерзлых, называемые таликами [Кожевников и др., 2012]. При поисках и изучении таликов ведущая роль отводится электроразведке методами сопротивлений [Огильви, 1990]. Талики, связанные с крупными водотоками, отчетливо отражаются на региональных геоэлектрических разрезах, которые строятся по данным ВЭЗ с целью общего изучения мерзлотных толщ либо в связи со структурными исследованиями. Основным инструментом для поиска и картирования таликов является многоразносное профилирование. Этот метод является эффективным при относительно неглубоком залегании талых пород. К недостаткам методов сопротивлений относится необходимость осуществлять гальванический контакт электродов с землей, что затрудняет проведение измерений в условиях мерзлой верхней части разреза.

Поэтому при поисках таликовых зон привлекают внимание индукционные зондирования методом переходных процессов (ЗМПП). Наряду с отсутствием заземлений к достоинствам этого метода относятся высокая локальность исследований, а также чувствительность по отношению к проводникам, открытым высокоомными экранами. Поскольку талые породы по сравнению с мерзлыми являются хо-

рошо проводящими, возможности метода переходных процессов при поисках таликов оцениваются как высокие.

Как ранее было отмечено во введении, в условиях криолитозоны существует проблема, связанная с эффектами быстро устанавливающейся индукционно-вызванной поляризации, проявляющейся в нарушении монотонности (вплоть до изменения полярности) переходных характеристик.

Рассмотрим результаты применения зондирования методом переходных процессов для поисков таликов в районе Пякяхинского нефтегазового месторождения с целью решения проблем водоснабжения.

Для инверсии данных ЗМПП была использована программа TEM-IP [Антонов и др., 2010], позволяющая решать прямые и обратные задачи ЗМПП в классе моделей горизонтально-слоистой проводящей и поляризующейся среды.

Работы в окрестностях Пякяхинского месторождения проведены А.К. Захаркиным в марте-апреле 2011 г. с аппаратурой ЦИКЛ-7 производства фирмы ЗаВеТ-ГЕО (г. Новосибирск). Поисковые маршруты прошли по двум профилям — речному и озерному. Измерения на речном профиле были выполнены вдоль р. Индикьяха. Озерный профиль меридионального направления пересек оз. Нгаркато. Основной объем профильных работ выполнен с шагом 100 м выносной установкой: генераторная петля 35×35 м, индукционный приемный датчик с эффективной площадью 400 или 2500 м² располагался на удалении 45 м от центра генераторной петли.

Поисковым работам предшествовали опытно-методические (всего шесть зондирований) на одном из водораздельных участков, где талики заведомо отсутствуют. Здесь для возбуждения и регистрации переходных процессов использовалась симметричная (соосная) установка с генераторной петлей 35×35 м, в центре которой располагался приемный датчик.

Инверсия переходных характеристик с учетом ВПИ дает представление о геоэлектрической модели водораздельного участка. Во всех случаях была подобрана трехслойная модель с поляризующимся верхним слоем (рис. 4, а). Параметры слоя ($\rho_1 = 10^3$ Ом·м, $\eta_1 = 0.6$, $\tau_1 = 150$ мкс, $c_1 = 1$) являются типичными для мерзлых осадочных пород. Поскольку ρ_1 велико, это, скорее всего, крупнозернистые породы типа песков.

Второй слой характеризуется низкими (порядка единиц ом на метр) значениями сопротивления. Его средняя мощность составляет 50 м, продольная проводимость — около 10 См. Вероятно, он представлен глинами, вода в которых даже при отрицательных температурах не замерзает. Сопротивление основания в среднем составляет около 15 Ом·м. Возможно, это тоже глины. Трехслойная геоэлектрическая модель с указанными выше параметрами (см. рис. 4, а) может быть использована в качестве референтной при оценке эффектов, создаваемых за счет присутствия талика в верхнем слое.

При появлении талика в верхней части разреза трехслойная модель трансформируется в пяти-слойную (см. рис. 4, б). Талик мощностью h_2 характеризуется пониженным (см. рис. 4, а, $\rho_2 = 200$ Ом·м) сопротивлением и отсутствием поляризуемости. Однако, как показало специально проведенное моделирование, влияние талика на переходную характеристику недостаточно для надежного определения его параметров в качестве отдельного слоя. Тем не менее в рамках трехслойной модели появление талика приводит к значимому изменению обобщенных или эквивалентных параметров верхнего слоя (который на самом деле образован тремя). Так, при появлении талика, являющегося неполяризующимся и более проводящим по сравнению с вмещающими мерзлыми породами, можно ожидать понижения удельного сопротивления и поляризуемости верхнего «обобщенного» слоя. Исходя из этих соображений, инверсия переходных характеристик, измеренных на речном и озерном профилях, проводилась в рамках трехслойной модели с поляризующимся верхним слоем (см. рис. 4, а).

На рис. 5 показаны результаты инверсии данных ЗМПП по озерному маршруту, представленные в виде графиков профилирования. Хотя параметры верхнего эквивалентного слоя характеризуются значительной «локальной» изменчивостью, в региональном плане графики со всей очевидностью отражают закономерные изменения параметров по профилю (см.

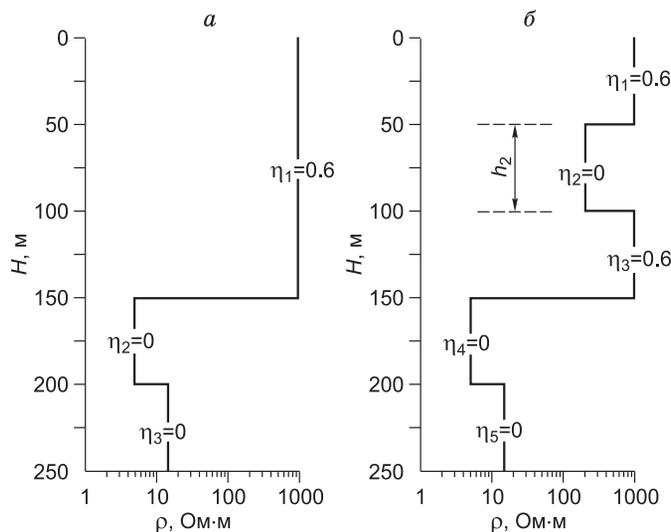


Рис. 4. Геоэлектрические модели:

а — референтная (без талика), б — с таликом в верхней части разреза.

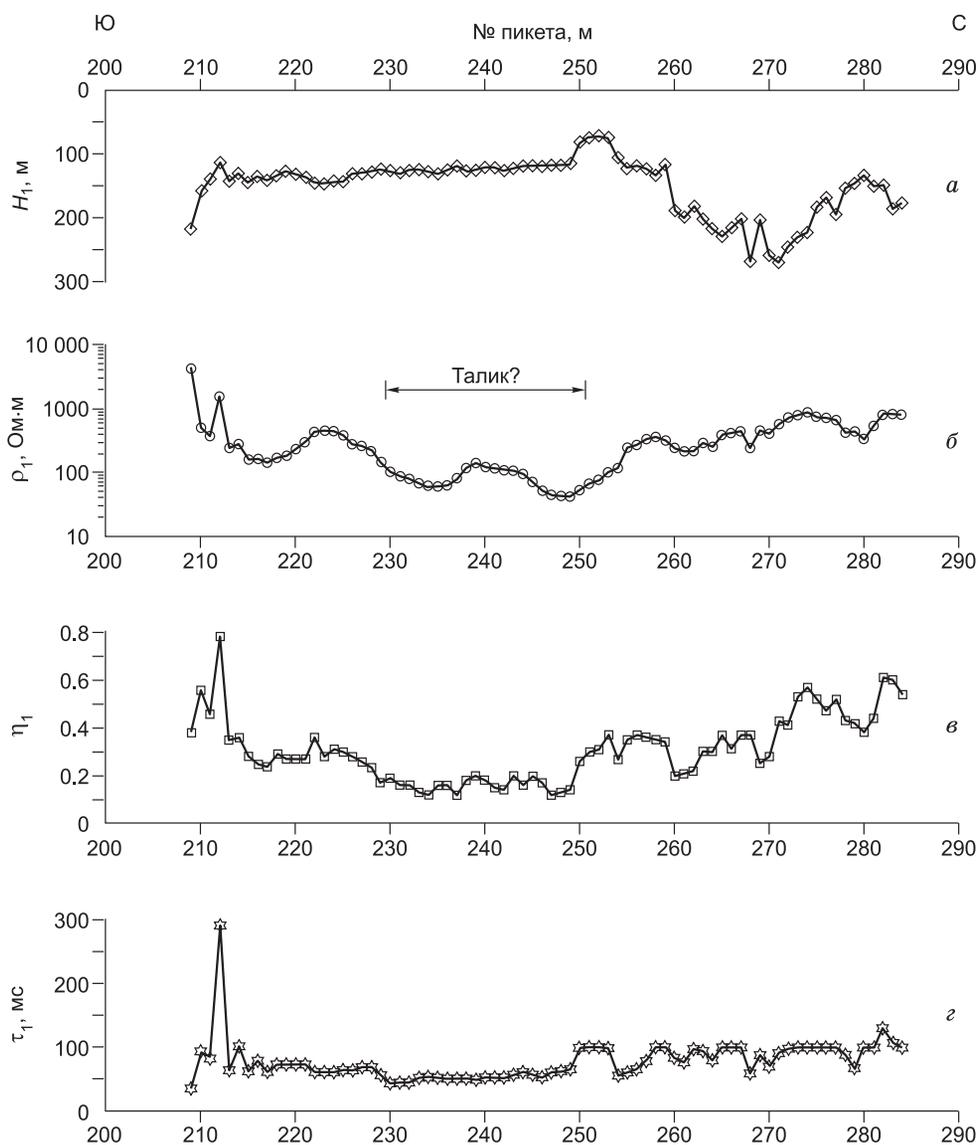


Рис. 5. Графики мощности h_1 (а), удельного электрического сопротивления ρ_1 (б), поляризуемости η_1 (в) и постоянной времени τ_1 (г) по озерному профилю.

Расстояние между соседними пикетами 100 м. Горизонтальной линией со стрелками отмечена зона, где наблюдаются низкие значения сопротивления и поляризуемости.

рис. 5). Мощность h_1 верхнего слоя изменяется от 72 м до 270 м, максимальные значения отмечаются на северном фланге профиля (ПК 260-280). Удельное электрическое сопротивление ρ_1 верхнего слоя изменяется в диапазоне от 43 до 4300 Ом·м, т.е. на три порядка. Максимальные значения УЭС отмечаются на флангах профиля, минимальные — в его центральной части. Поляризуемость η_1 составляет 0.12—0.78. Минимальные значения η_1 отмечаются в центральной части профиля, максимальные — на флангах. Постоянная времени τ_1 поляризационного процесса изменяется в диапазоне 35—290 мкс, среднее значение составляет 80 мкс. В целом южный фланг профиля характеризуется более высокими значениями τ_1 по сравнению с северным. Локальные аномалии τ_1 на профиле не просматриваются. Что касается c_1 — показателя степени в формуле Коул—Коула, то этот параметр во всех случаях оказался равным единице.

Найденный в результате инверсии набор параметров верхнего слоя является типичным для мерзлых осадочных пород [Kozhevnikov, Antonov, 2006]. С точки зрения локализации возможных таликов наибольший интерес представляет центральный отрезок профиля протяженностью около 2 км (ПК 230-250). Здесь наблюдаются самые низкие значения удельного электрического сопротивления ρ_1 и

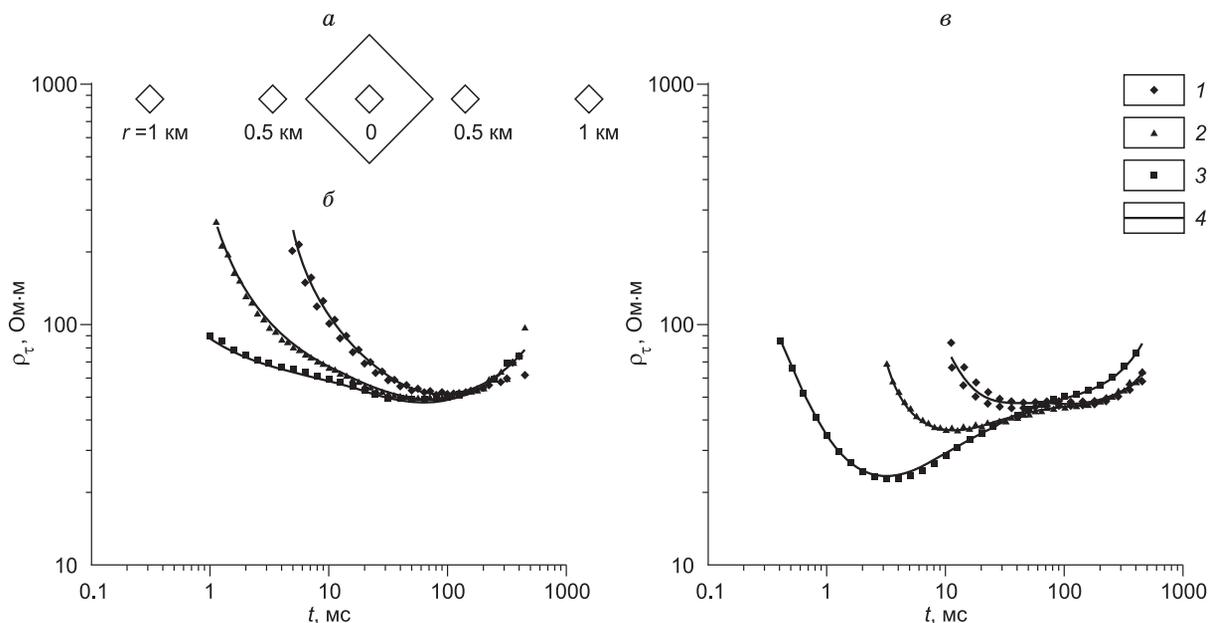


Рис. 6. Система наблюдений методом ЗСБ (а); кривые ρ_t , измеренные на Заславском (б) и Среднеокинском (в) участках.

1—3 — полевые данные: 1 — разнос 1 км, 2 — разнос 0.5 км, 3 — соосная установка, 4 — модельная кривая.

поляризуемости η_1 верхнего слоя. Это позволяет с большой долей вероятности предполагать здесь наличие протяженного талика.

Нефтепоисковые исследования в Восточной Сибири. Следующий пример иллюстрирует возможности использования программы совместной инверсии индукционных переходных характеристик с проявлениями ВПИ, измеренных при нефтепоисковых работах в одном из районов юга Восточной Сибири. Метод ЗСБ на юге Восточной Сибири применяется с начала 70-х годов прошлого века, однако в отличие от соседней с этим регионом Западной Якутии проявления ВПИ здесь ранее не отмечались. Одна из причин заключается в том, что для структурных исследований использовались соосные установки с большими (0.5—1 км и более) генераторными петлями. При таких разносах эффекты ВПИ слабо проявлены на фоне индукционного становления. В последние годы проявления ВПИ стали заметны благодаря использованию новой схемы наблюдений [Кожевников, Компаниец, 2010; Антонов и др., 2011б]: на каждом пункте зондирования выполняются пятью установками — одной соосной и четырьмя разнесенными (рис. 6, а). Размер генераторной петли составляет 500×500 м, разнос — 0 (соосная установка), 500 и 1000 м.

Геoeлектрический разрез на юге Восточной Сибири может быть аппроксимирован горизонтально-слоистой (одномерной) моделью без азимутальной анизотропии. Если породы проводящие, но не поляризующиеся, переходные характеристики, измеренные соосной и разнесенными установками, отличаются на ранних временах, однако совпадают на поздних. Точечная и совместная инверсия переходных характеристик дает один и тот же результат (модель). Этот случай иллюстрирует рис. 6, б, где показаны кривые кажущегося удельного сопротивления ρ_t , измеренные в пределах Заславского лицензионного участка (Ангаро-Ленское плато, юго-запад Иркутской области).

Иная картина наблюдалась при изучении Среднеокинского лицензионного участка, граничащего на западе с Заславским (см. рис. 6, в). На поздних временах кривые ρ_t , измеренные разнесенными установками, сливаются. Однако в отличие от предыдущего случая правая ветвь кривой ρ_t для соосной установки располагается выше по отношению к правой ветви кривых для разнесенных установок. Если не учитывать поляризуемость, инверсия данных, измеренных разнесенными установками, дает одну и ту же геoeлектрическую модель, однако она сильно отличается от той, которая получена в результате инверсии данных, измеренных соосной установкой. В этом случае не удается выполнить совместную инверсию данных, измеренных всеми пятью установками. При общем объеме наблюдений на Среднеокинском участке в количестве 200 физических точек проявления ВПИ отмечены на 85 % из них.

Совместная инверсия с учетом поляризуемости позволила согласовать данные измерений с разнесенными и соосной установками на основе единой модели. В целом геoeлектрическая модель соответ-

твует разрезу осадочного чехла юга Сибирской платформы. Поляризующимся является верхний слой мощностью 50—80 м с параметрами: $\rho = 10\text{—}15$ Ом·м, $\eta = 3\text{—}4\%$, $\tau = 50\text{—}60$ мс, $c \cong 0.5$. Слой представлен юрскими породами мощностью до 60 м, в состав которых входят угленосные отложения с включениями графита и пирита. Скорость установления вызванной поляризации на Среднеокинском участке примерно на три порядка ниже по сравнению с наблюдаемой в Якутии, а времена релаксации распределены в широком диапазоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан программно-алгоритмический комплекс для интерпретации данных индукционных импульсных электромагнитных зондирований с учетом ВПИ.

Обоснована методика поэтапной интерпретации данных индукционных импульсных электромагнитных зондирований поляризующихся сред.

Программный комплекс и методика интерпретации показали высокую эффективность при поисках таликовых зон в районе Пякяхинского нефтегазового месторождения и нефтепоисковых работах на юге Сибирской платформы.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.0615 «Разработка и практическое применение эффективных программно-алгоритмических средств для моделирования нестационарных электромагнитных полей в трехмерных проводящих и поляризующихся геологических средах».

ЛИТЕРАТУРА

Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А. «ТЕМ-IP» — система интерпретации данных индукционных импульсных зондирований поляризующихся сред [электронный ресурс] // Международная научно-практическая конференция «Электромагнитные методы исследований-2010» (Иркутск, 15—20 августа 2010 г.). 2010. 2 с. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM), ISBN 978-5-88942-096-5.

Антонов Е.Ю., Штабель Н.В., Корсаков М.А. Численное моделирование и инверсия данных импульсных зондирований сложнопостроенных геологических сред // Геофизические методы при разведке недр / Под ред. Л.Я. Ерофеева, В.И. Исаева. Томск, Изд-во Том. политех. ун-та, 2011а, с. 8—11.

Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Компаниец С.В. Проявления и учет индукционно-вызванной электрической поляризации верхней части разреза Восточной Сибири // ГЕО-Сибирь-2011. Т. 2. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Ч. 1. Сб. материалов VII Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2011», 19—29 апреля 2011 г., Новосибирск. Новосибирск, СГГА, 2011б, с. 182—186.

Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Инверсия данных МПП с учетом быстропротекающей индукционно-вызванной поляризации: численный эксперимент на основе модели однородного поляризующегося полупространства // Геофизика, 2007, № 1, с. 42—50.

Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Совместная инверсия данных МПП с учетом индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика, 2009а, т. 50 (2), с. 181—190.

Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Импульсная индуктивная электроразведка поляризующихся сред // Геофизический журнал, 2009б, т. 31, № 4, с. 104—118.

Кожевников Н.О., Компаниец С.В. Интерпретация данных ЗСБ с учетом параметров индукционно-вызванной поляризации // Первая международная научно-практическая конференция по электромагнитным методам исследования «ГЕОБАЙКАЛ-2010» (Иркутск, 2010 г.). 2010, ISBN 978-5-88942-096-5.

Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю., Корсаков М.А., Захаркин А.К. Проявления и учет индукционно-вызванной поляризации при поисках таликовых зон в районе Пякяхинского нефтегазового месторождения // ГЕО-Сибирь-2012. Т. 1. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Ч. 1. Сб. материалов VIII Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2012», 10—20 апреля 2012 г., Новосибирск. Новосибирск, СГГА, 2012, с. 168—173.

Могилатов В.С., Захаркин А.К., Злобинский А.В. Математическое обеспечение электроразведки ЗСБ. Система «Подбор» / Ред. Н.О. Кожевников. Новосибирск, Академ. изд-во «Гео», 2007, 157 с.

Огильви А.А. Основы инженерной геофизики / Ред. В.А. Богословский. М., Недра, 1990, 501 с.

Светов Б.С., Агеев В.В. Влияние поляризуемости горных пород на результаты электромагнитных зондирований // Физика Земли, 1999, № 1, с. 19—27.

Стогний Вас.В., Коротков Ю.В. Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов. Новосибирск, Изд-во «Малотиражная типография 2D», 2010, 121 с.

Табаровский Л.А. Электромагнитные поля поперечно-электрического и поперечно-магнитного типа в многослойных средах // Электромагнитные методы исследования скважин / Ред. Ю.Н. Антонов. Новосибирск, Наука, 1979, с. 225—233.

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

Табаровский Л.А., Эпов М.И. Прямая задача зондирования становлением поля для среды с набором тонких проводящих пластин // Изв. вузов. Сер. Геология и разведка, 1990, № 7, с. 113—117.

Табаровский Л.А., Эпов М.И., Дашевский Ю.А., Ельцов И.Н. Система автоматизированной интерпретации результатов электромагнитных зондирований «ЭРА» // Всесоюзный семинар «Нетрадиционные методы геофизических исследований неоднородностей в земной коре», Звенигород, 14—16 декабря 1989 г. М., 1989, с. 43—44.

Тихонов А.Н., Скугаревская О.А. О становлении электрического тока в неоднородной среде. I // Изв. АН СССР. Сер. Геофиз. 1950, Т. XIV, № 3, с. 199—222.

Хабинов О.Г., Власов А.А., Антонов Е.Ю. Система интерпретации данных площадных электромагнитных зондирований // ГЕО-Сибирь-2010. Т. 2. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технология поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Ч. 1. Сб. материалов VI Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2010», 19—29 апреля 2010 г., Новосибирск. Новосибирск, СГГА, 2010, с. 164—168.

Эпов М.И., Антонов Е.Ю. Прямые задачи электромагнитных зондирований с учетом дисперсии геоэлектрических параметров // Физика Земли, 1999, № 3—4, с. А48—А55.

Эпов М.И., Антонов Е.Ю. Исследование влияния параметров вызванной поляризации при нестационарных электромагнитных зондированиях сложно построенных геологических сред // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (6), с. 920—929.

Эпов М.И., Дашевский Ю.А., Ельцов И.Н. Автоматизированная интерпретация электромагнитных зондирований. Новосибирск, 1990, 29 с. (Препринт / ИГиГ СО АН СССР; № 3).

Barsukov P.O., Fainberg E.B., Khabensky E.O. Shallow investigations by TEM-FAST technique: methodology and examples // Chapter 3 in «Methods in Geochemistry and Geophysics». V. 40 / Ed. V.V. Spichak. 2007, doi: 10.1016/S0076-6895(06)40003-2.

Cole K.S., Cole R.H. Dispersion and absorption in dielectrics // J. Chem. Phys., 1941, v. 6, p. 341—353.

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, v. 54, p. 383—397.

Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. Inversion of TEM data affected by fast-decaying induced polarization: numerical simulation experiment with homogeneous half-space // J. Appl. Geophys., 2008, № 66, p. 31—43.

Lee T. Transient response of a polarizable ground // Geophysics, 1981, v. 46, № 7, p. 1037—1041.

McAllister K., Raiche A.P. Program GRENDL — Manual prepared for AMIRA by the Mathematical Geophysics Group, CSIRO Division of Exploration Geoscience, 1986.

Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization // Computer J., 1965, № 7, p. 308—313.

Stoyer C.H. TEMIX-G-user's manual. Interpex Limited, Golden, CO. 1988.

*Рекомендована к печати 11 октября 2013 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
16 апреля 2013 г.*