

Обнаружение проявлений вызванной поляризации в индукционных переходных процессах при работе с соосными петлями

Е. Ю. Антонов^{1}, Н. О. Кожевников¹, М. А. Корсаков¹*

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
*e-mail: antonovey@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Обсуждаются способы дифференциации больших массивов данных, полученных в результате площадных зондирований методом переходных процессов, для нахождения областей с разной степенью проявлений в сигнале индукционно-вызванной поляризации или ее отсутствия.

Ключевые слова: метод переходных процессов, индукционно-вызванная поляризация, мёрзлые породы

Detection of Manifestations of Induced Polarization in Induction Transient Processes when Working with Coaxial Loops

E. Yu. Antonov^{1}, N. O. Kozhevnikov¹, M. A. Korsakov¹*

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
*e-mail: antonovey@ipgg.sbras.ru

Abstract. Methods for differentiating large data arrays, obtained as a result of areal soundings by the transient electromagnetics method, are discussed, in order to find regions, with varying degrees of manifestations in the signal of induction-induced polarization or its absence.

Keywords: transient electromagnetic method, inductively induced polarization, frozen rocks

Введение

Особенностью современных малоглубинных исследований методом переходных процессов становится их большой объём и площадной характер. Это предъявляет новые требования к совершенствованию автоматизированных методов обработки. Один из таких способов рассмотрен в предлагаемой статье.

При работах методом переходных процессов (МПП) в районах Арктики и Крайнего Севера, в местах распространения многолетнемерзлых пород, в переходных характеристиках часто проявляются эффекты индукционно-вызванной поляризации (ВПИ). Учёт поляризуемости среды в решении прямой задачи осуществляется на основе формулы для частотно-зависимого комплексного удельного электрического сопротивления (УЭС) [1]:

$$\rho_{cc}(\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right\}, \quad (1)$$

причём породы верхней части разреза (ВЧР), сильнее всего влияющие на результаты измерений особенно в присутствии ВПИ, характеризуются устойчивым набором поляризационных параметров, входящих в формулу (1): поляризуемость m заключена в диапазоне от 0. до 1.; постоянная времени релаксации τ поляризационного процесса изменяется от единиц до первых сотен микросекунд, а характерный показатель степени s близок к единице. Характерные значения УЭС многолетнемёрзлых пород (ММП) изменяются от первых десятков до десятков тысяч Ом·м.

Метод исследования

Работа посвящена обсуждению результатов малоуглубинных площадных измерений методом переходных процессов, которые выполнялись для изучения верхней части разреза до 500 м и картирования толщи ММП [2-5]. Установка: генераторная петля – 100м×100м, три измерительные многовитковые петли – 20м×20м. Измерительные петли располагались следующим образом: одна петля соосно генераторной, две выносные в обоих направлениях по профилю, разнос 100 м. Шаг установки по профилю составлял 500 м, расстояние между профилями 300 м. Участок исследований, расположенный на п-ове Ямал имел площадь порядка 750 км². В общей сложности на исследуемой площади было выполнено около 14000 наблюдений, среди которых более 4500 - соосными установками. Анализ данных выявил большое количество переходных характеристик как с признаками ВПИ, так и не содержащих этих признаков. К явным проявлениям ВПИ относится двукратная и более смена полярности кривых электродвижущей силы (эдс) на ранних временах (рис. 1, красная кривая). Помимо явных признаков ВПИ существуют менее выраженные, которые проявляются понижением эдс на ранних временах. Характерные кривые эдс и кажущихся сопротивлений при разной поляризуемости m показаны на рис. 1. Расчёты выполнялись с помощью программы UnvQQIP (ИНГГ СО РАН, Е.Ю. Антонов) для случая проводящего поляризующегося полупространства с сопротивлением $\rho=300$ Ом·м, временем релаксации $\tau=1e-5$ с и показателем степени $s=1$ (такие параметры среды можно считать характерными для ММП). Установка во всех расчётах упоминаемых в данной работе – петлевая соосная: генератор – 100м×100м, измеритель - 20м×20м. Параметр поляризуемости m варьировался от 0 до 0.35. Сравнение нормальных кривых ($m=0$) с кривыми, на которых есть проявления ВП ($m>0$) позволяют оценить влияние поляризации на качественном уровне. Из рис. 1а видно, что при увеличении m амплитуда эдс сначала становится больше нормальной на отрезке от 1 до 11 мкс, потом становится меньше в интервале от 11 до 102 мкс. Причем для $m=0.3$ график эдс имеет локальный минимум на времени ~30 мкс, а эдс при $m=0.35$ становится отрицательной в интервале от 22 до 35 мкс. На рис. 1б приведены графики кажущегося сопротивления, более выразительно показывают расхождения графиков нормальной и поляризующихся кривых.

Поведение эдс и кажущегося сопротивления (наличие локальных экстремумов или точек перегиба) дают основания полагать, что возможно выявлять присутствие в сигнале поляризационной составляющей с помощью первой и второй

производных по времени. Чтобы проверить это предположение были выполнены расчеты для модели проводящего поляризующегося полупространства. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

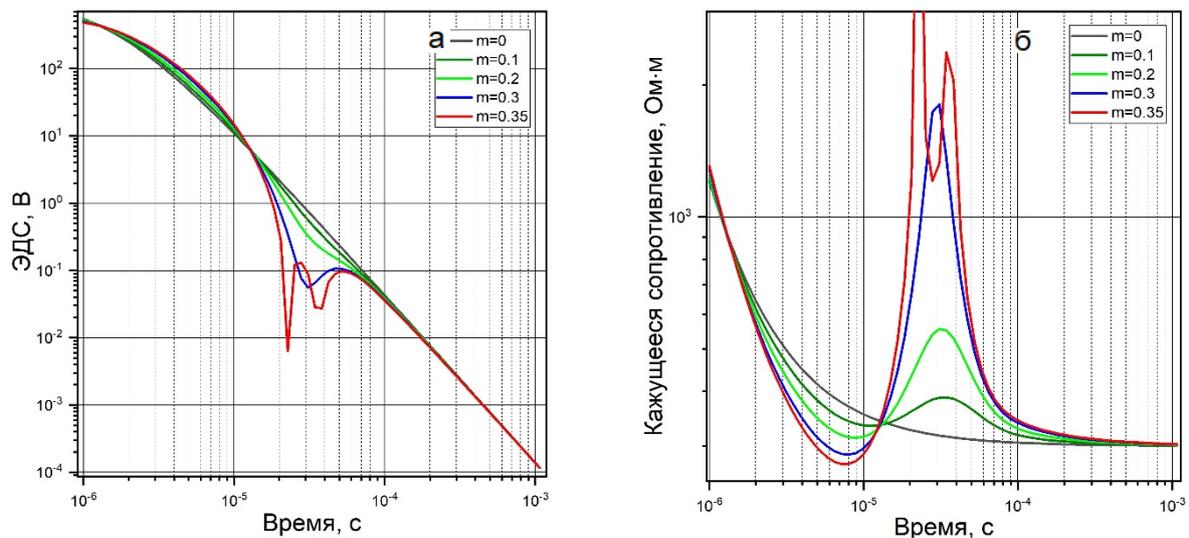


Рис. 1. Переходные характеристики - а и кривые кажущегося сопротивления-б для модели поляризующегося полупространства: $\rho=300$ Ом·м, $\tau=1e-5$ с, $c=1$, при изменяющемся параметре поляризуемости m (0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.35)

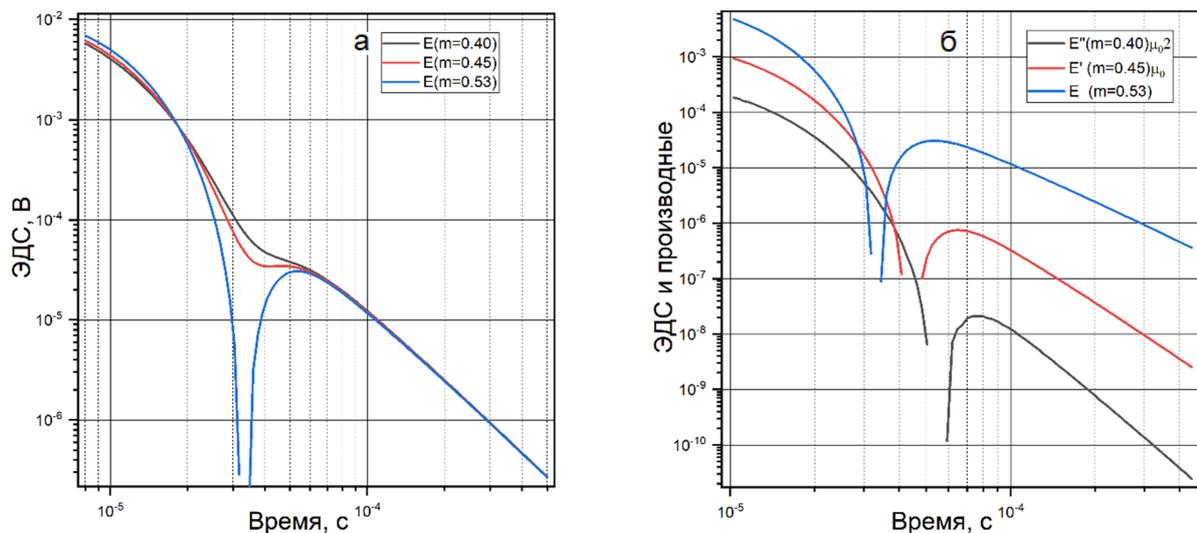


Рис. 2. Модель – проводящее поляризующееся полупространство: $\rho=100$ Ом·м, $\tau=1e-5$ с, $c=1$; а – эдс для $m=0.4, 0.45, 0.53$; б – эдс ($m=0.53$) и производные 1 и 2 порядков для $m=0.53, 0.45, 0.4$ соответственно

На рис. 2а показаны эдс для поляризуемости: $m=0.53$ (присутствие ВПИ явно, т.к. дважды происходит смена полярности сигнала), для кривых, со значениям $m=0.45$ и $m=0.4$ выполнялось однократное и двукратное дифференцирование по времени, соответственно, результаты показаны на рис. 2б. Из рисунка 2 видно, что операция вычисления производных позволяет диагностировать нали-

чие ВПИ при значениях параметра поляризуемости 0.4, которое почти на 25% ниже «критического» значения $m=0.53$, когда наличие ВПИ в сигнале очевидно.

Аналогичные расчеты были выполнены для модели поляризующегося полупространства с набором сопротивлений $\rho = 100, 1000, \text{ и } 5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, двух времен релаксации $\tau = 5, 10 \text{ мкс}$ (чтобы показать, что при увеличении τ выявляется ВПИ с меньшими значениями m), и показателя степени $c=1$. В табл. 1 приведены значения поляризуемости, при превышении которых на кривых эдс или производных появляется двойная смена полярности. Расчёты выполнялись с помощью программы UnvQQIP.

Таблица 1

«Критические» значения поляризуемости m для выявления эффекта ВПИ по эдс и её производным (α – порядок производной)

$\tau \setminus \rho$	100 Ом·м			1000 Ом·м			5000 Ом·м		
5.e-6 с	0.71	0.61	0.54	0.25	0.21	0.19	0.12	0.1	0.09
1.e-5 с	0.53	0.45	0.4	0.18	0.15	0.13	0.08	0.07	0.06
α	0	1	2	0	1	2	0	1	2

Обработка полевых данных

На рис. 3 представлена схема расположения точек измерения методом переходных процессов соосными установками на площади одного из нефтегазоносных участков п-ова Ямал. Качество измерений, выполненное сотрудниками компании «Сигма-Гео» (г. Иркутск) высокое. Важной особенностью материала является его однородность: все данные записаны одной установкой в широком временном интервале.

Был выполнен анализ данных для выявления массивов эдс, имеющих: явные признаки ВПИ (смена полярности два и более раза), признаки поляризации, выявленные по производным первого и второго порядка и эдс, не попавшие в указанные три группы. Последние полагались не осложненными эффектами ВПИ, для инверсии которых можно использовать модели проводящей неполяризующейся среды. Данное утверждение не является строгим, и может означать, что поляризация проявлена недостаточно, чтобы быть выявлена по второй производной. Но это можно установить только по результатам инверсии. Рисунок 3 показывает четыре группы точек наблюдений, которые выделены разными цветами: 1-красные, без ВП, 2-синие, данные с явными признаками ВП, 3-фиолетовые, признак ВП - первая производная, 4-серые, признак ВП – вторая производная.

Разбиение больших массивов данных на подобные группы полезно при их автоматизированной обработке. Интерпретация данных из группы 1 в рамках модели проводящей неполяризующейся среды позволяет сформировать стартовые модели, которые целесообразно использовать при инверсии данных, осложнённых влиянием вызванной поляризации. Модель проводящей неполяризующейся среды позволяет повысить достоверность решения более сложной обратной задачи для поляризующихся сред.

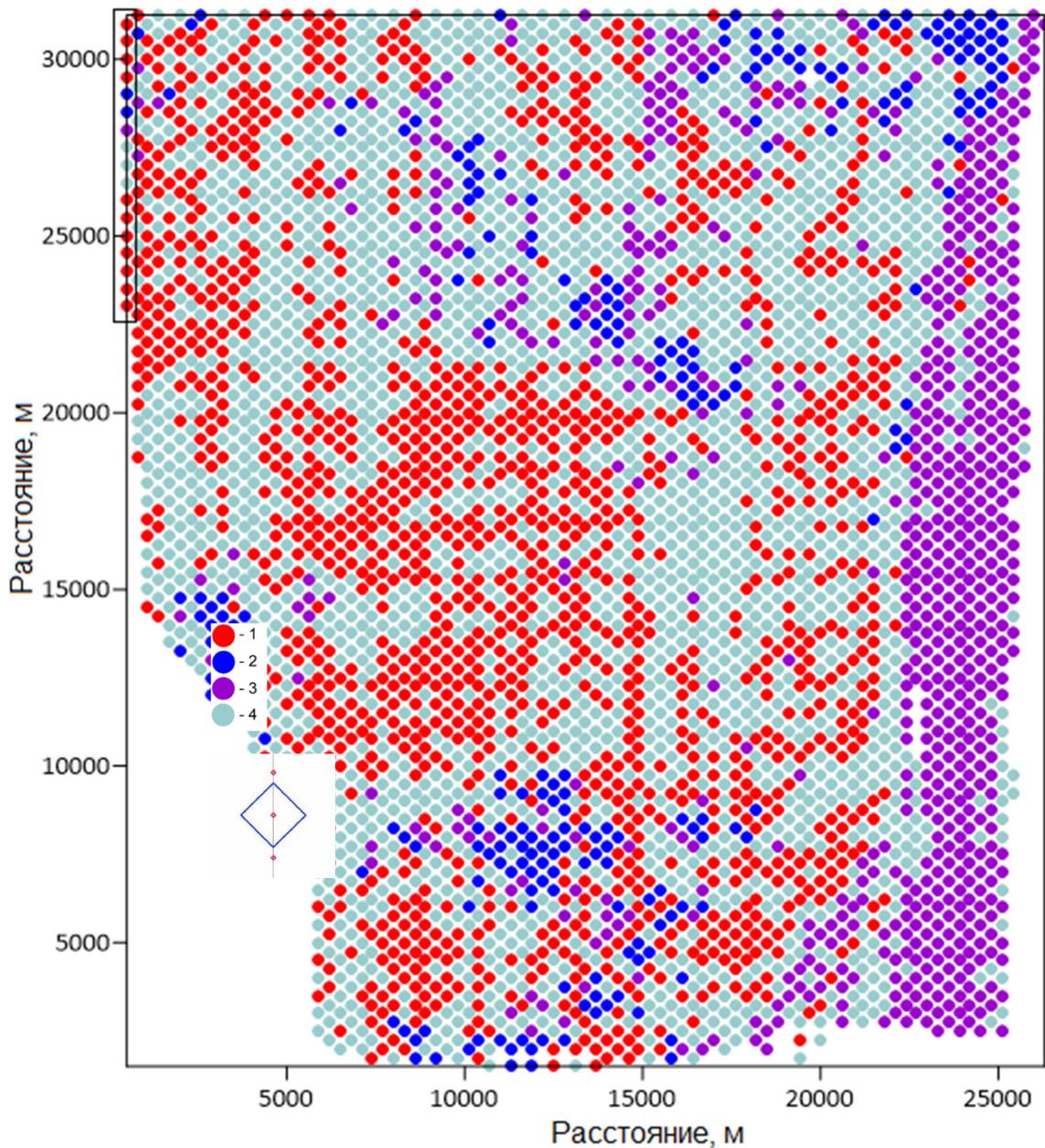


Рис. 3. Схема расположения соосных установок. Пример дифференциации массива данных МПП по признакам наличия или отсутствия ВПИ: 1-без ВПИ, 2-явное наличие ВПИ, 3, 4-наличие ВПИ по 1 и 2 производной, соответственно. В левом верхнем углу схемы профиль 17-1 (в прямоугольном контуре)

Рассмотрим работу такого подхода к инверсии данных зондирований МПП. На рис. 3 в левом верхнем углу схемы узким прямоугольником отмечен профиль, который представлен всеми четырьмя типами данных. Пикеты 17-14, 7-1 – без ВП, пикеты 13 и 12 – с явными признаками ВП, пикет 11 – имеет признаки ВП по первой производной и пикеты 10-8 имеют признаки ВП по второй производной. На рис. 4 представлен геоэлектрический разрез, полученный в результате инверсии данных профиля 17-1 с помощью программы TEM-IP, v. 2 (ИНГГ СО РАН) [6, 7].

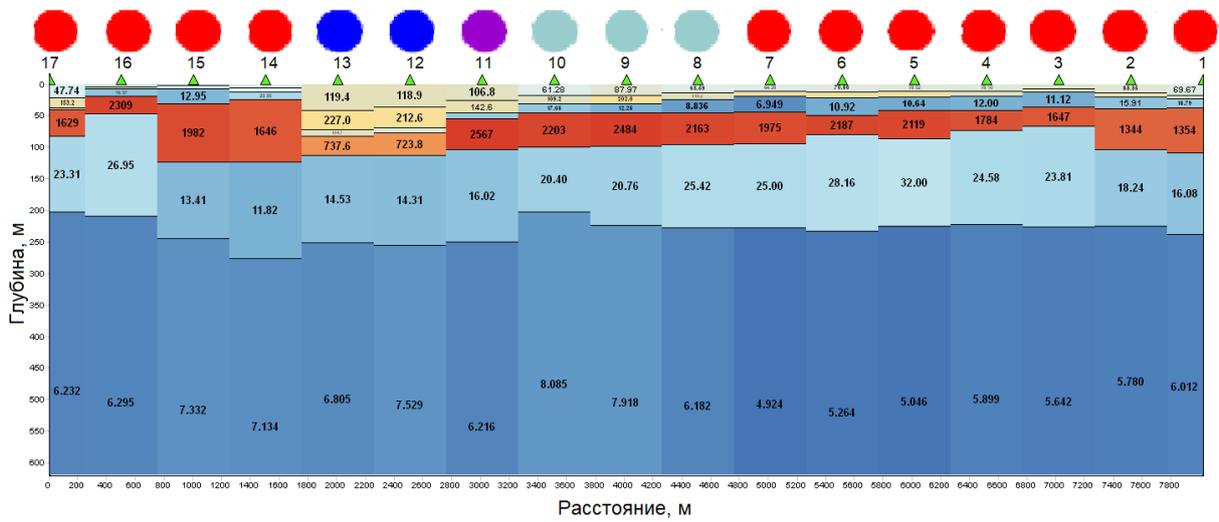


Рис. 4. Геоэлектрический разрез, профиль 17-1

Сначала выполнялся подбор данных неосложнённых ВПИ (пикеты 17-14 и 1-7), затем пикеты 8-11 с ВП определенной по производным, и наконец, пикеты 12-13 с сильным влиянием ВП. Из рис. 4 видно, что геоэлектрический разрез выдержан по горизонтали за исключением тех участков в верхней части, где отмечаются проявления ВПИ.

На рис. 5 и 6 показаны результаты инверсии для пикетов 3, 12, 9 и 11 относящихся к разным типам данных по классификации предложенной в данной статье (пояснения в подписях к рисункам).

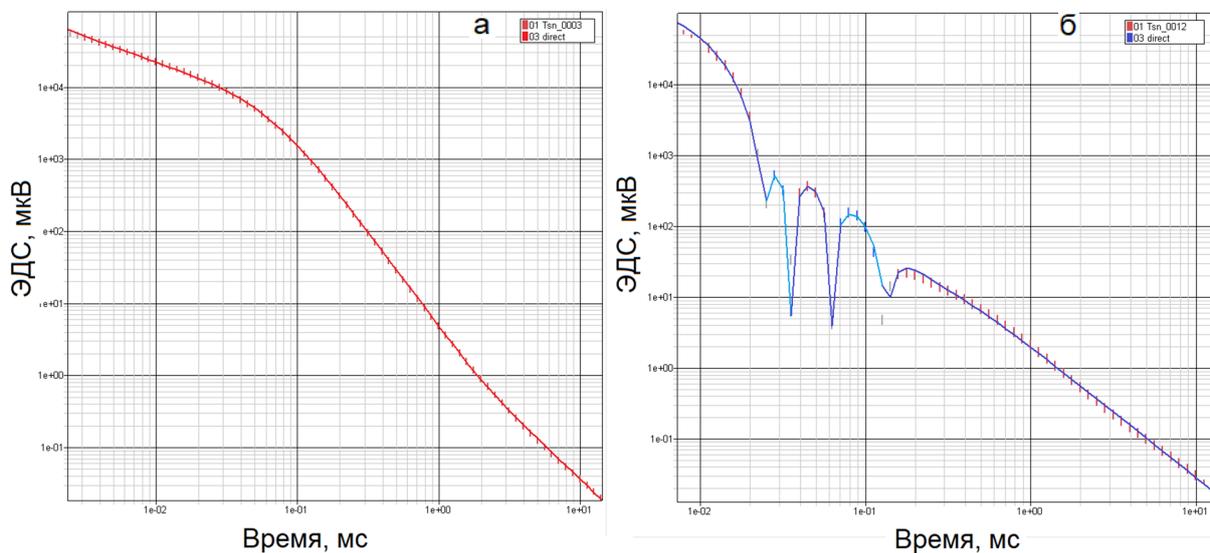


Рис. 5. Качество подбора экспериментальных данных: а – пикет 3 (без ВП); б – пикет 12 (ВП)

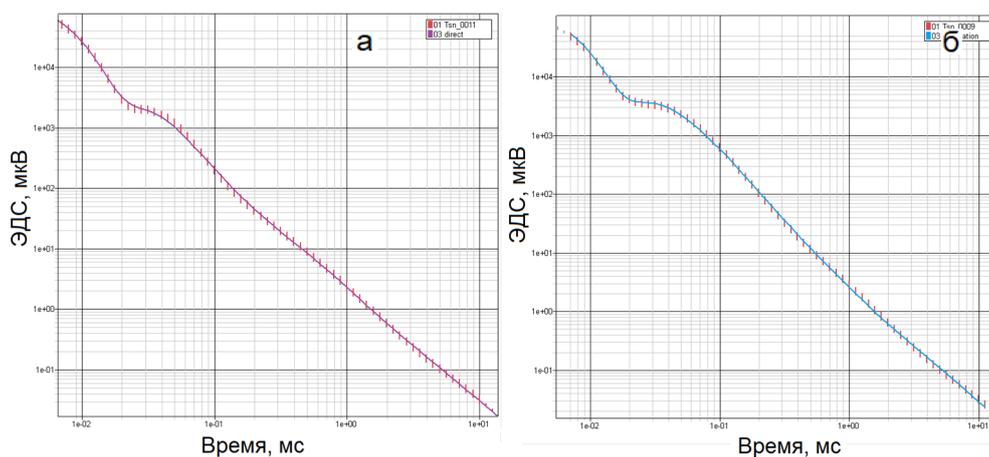


Рис. 6. Качество подбора экспериментальных данных: а – пикет 11 (ВПИ по первой производной); б – пикет 9 (ВПИ по второй производной)

На рис. 5 и 6 экспериментальные данные показаны вертикальными отрезками, обозначающими 5% интервалы, а расчётные кривые даны сплошными линиями. Качество инверсии характеризуется величиной среднеквадратичного отклонения для пикетов: п. 3 – 0.02, п. 9 – 0.06, п. 11– 0.07, п. 12 – 0.08. Модели к рис. 5 и 6 приведены в Табл. 2 и 3.

Таблица 2

Геоэлектрические модели для пикетов 3 и 12 (рис. 5)

Пикет 3			Пикет 12					
N	ρ	h	N	ρ	h	m	τ	c
1	92	9	1	119	37.5	0.57	1.26e-5	1
2	112	5.1	2	213	33.6	0.75	6.45e-5	1
3	11	23.3	3	73.5	7.1			
4	1647	30	4	724	36.6			
5	24	161	5	14.3	142			
6	5.6		6	7.5				

Таблица 3

Геоэлектрические модели для пикетов 11 и 9 (рис. 6)

Пикет 11						Пикет 9					
N	ρ	h	m	τ	c	N	ρ	h	m	τ	c
1	107	27	0.33	7.13e-6	1	1	88	19	0.33	7.93e-6	1
2	143	19				2	202	13			
3	19	10				3	12.3	15.3			
4	2567	49				4	2484	52.3			
5	16	147				5	21	126			
6	6.2					6	8				

Заключение

Разработан программный модуль Analysis_IPDB, вошедший в новую версию системы TEM-IP v.2, для автоматической идентификации данных МПП на наличие или отсутствие поляризационной составляющей.

Представлен анализ и разбиение на классы: 1 - эдс без ВПИ и 2 - эдс с разными степенями проявления ВПИ большого массива экспериментальных переходных характеристик, полученных при полевых работах на п-ове Ямал для картирования толщи многолетнемёрзлых пород.

Приведены результаты автоматической инверсии с помощью новой версии программы TEM-IP, v. 2 для групп данных зондирования МПП, не осложнённых эффектом ВПИ, и данных с выявленной ВПИ по явным признакам или производным первого и второго порядка.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ FWZZ-2022-0024 «Геоэлектрические и электромагнитные методы исследования верхней части земной коры: теория, модели, эксперимент». Авторы благодарят сотрудников компании «Сигма-Гео» М.В. Шарлова, И.К. Семинского и И.В. Буддо, любезно предоставивших полевые данные и участвовавших в обсуждении данной работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pelton W.H., Ward S.H., Hallof P.G., Sill W.R., Nelson P.H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP // *Geophysics*. – 1978. – Vol.43. – №3. – P.588-609.
2. Lévesque Y., Walter J., Chesnaux R. Transient Electromagnetic (TEM) Surveys as a First Approach for Characterizing a Regional Aquifer: The Case of the Saint-Narcisse Moraine, Quebec, Canada // *Geosciences*. – 2021. – Vol.11. – №10:415. – 25 p.
3. Buddo I., Sharlov M., Shelokhov I., Misyurkeeva N., Seminsky I., Selyaev V., Agafonov Y. Applicability of Transient Electromagnetic Surveys to Permafrost Imaging in Arctic West Siberia // *Energies*. – 2022. – Vol.15. – №5:1816.
4. Misyurkeeva N., Buddo I., Shelokhov I., Smirnov A., Nezhdanov A., Agafonov Y. The Structure of Permafrost in Northern West Siberia: Geophysical Evidence // *Energies*. – 2022. – Vol.15. – №8:2847. – 12 p.
5. Misyurkeeva N., Buddo I., Kraev G., Smirnov A., Nezhdanov A., Shelokhov I., Kurchatova A., Belonosov A. Periglacial Landforms and Fluid Dynamics in the Permafrost Domain: A Case from the Taz Peninsula, West Siberia // *Energies*. – 2022. – Vol.15. – №8:2794. – 14 p.
6. Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А. Автоматизированная система для интерпретации данных индукционных импульсных электромагнитных зондирований с учётом индукционно-вызванной поляризации // *Геология и геофизика*. – 2014. – Т.55. – №8. – С. 1282-1293.
7. Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А., Эпов М.И. Программа для ЭВМ «ТЕМ-IP» свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS 2018612347 от 15.02.2018.

© Е. Ю. Антонов, Н. О. Кожевников, М. А. Корсаков, 2022