

Оригинальная статья / Original article

УДК 550. 372

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-2-80-90>

ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСТАНОВОК ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПОЛЕЙ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

© А.В. Поспеев^a, Е.В. Мурзина^b, С.В. Компаниец^c, В.С. Емельянов^d

^aИркутский научный центр СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134.

^aИнститут земной коры СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

^{b-d}АО «Иркутское электроразведочное предприятие»,
664011, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Рабочая, 2а.

^bИркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. Цель. Исследования направлены на изучение поведения пространственно-временных характеристик полей индукционно-вызванной поляризации, возбуждаемых электрическим и магнитным источниками для геоэлектрических условий юга Сибирской платформы. **Методы.** Путем численного моделирования электромагнитного поля рассчитаны переходные характеристики для типичной геоэлектрической модели. На основании анализа модельных данных оценена чувствительность нестационарных электромагнитных зондирований к измерению эффектов вызванной поляризации. Для определения глубины расположения поляризующихся слоев проведена специальная модификация аппарата инверсии. **Результаты.** На примере одной из площадей 3D-исследований методом зондирования становлением поля в ближней зоне, расположенных в северо-восточной части Непского свода, показан характер изменения коэффициента поляризуемости и положения поляризующегося слоя. **Выводы.** Применение магнитного источника позволяет увеличить надежность изучения проводимости и поляризуемости геологического разреза юга Сибирской платформы.

Ключевые слова: электроразведка, электрический и магнитный диполи, вызванная поляризация, удельное электрическое сопротивление, автоматическая инверсия.

Информация о статье. Дата поступления 23 марта 2018 г.; дата принятия к печати 4 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 29 июня 2018 г.

Формат цитирования. Поспеев А.В., Мурзина Е.В., Компаниец С.В., Емельянов В.С. Возможности электромагнитных установок при изучении полей вызванной поляризации // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 2. С. 80–90. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-2-80-90

^aПоспеев Александр Валентинович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Иркутского научного центра СО РАН и Института земной коры СО РАН, e-mail: avp@ierp.ru
Alexander V. Pospeev, Doctor of Geology and Mineralogy, Leading Researcher of Irkutsk Scientific Center SB RAS and the Institute of the Earth's Crust SB RAS, e-mail: avp@ierp.ru

^bМурзина Екатерина Викторовна, аспирант Иркутского национального исследовательского технического университета, геофизик АО «Иркутское электроразведочное предприятие», e-mail: bkvv@ierp.ru
Ekaterina V. Murzina, Postgraduate of Irkutsk National Research Technical University, Geophysicist of Irkutsk Electroprospecting Company JSC, e-mail: bkvv@ierp.ru

^cКомпаниец Софья Викторовна, ведущий геофизик, e-mail: ksv@ierp.ru
Sofia V. Kompaniets, Leading Geophysicist, e-mail: ksv@ierp.ru

^dЕмельянов Вячеслав Сергеевич, геофизик, e-mail: evs@ierp.ru
Vyacheslav S. Emelianov, Geophysicist, e-mail: evs@ierp.ru

CAPABILITIES OF ELECTROMAGNETIC INSTALLATIONS WHEN STUDYING THE FIELDS OF INDUCED POLARIZATION

© A.V. Pospeev, E.V. Murzina, S.V. Kompaniets, V.S. Emelianov

Irkutsk Scientific Center SB RAS,
134 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation
Irkutsk Electroprospecting Company JSC,
2a Rabochaya St., Irkutsk 664011, Russian Federation
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

ABSTRACT. Purpose. The research is aimed at studying the behavior of space and time characteristics of the fields of induced polarization caused by electric and magnetic sources typical for geoelectric settings of the south of Siberian craton. **Methods.** Numerical simulation of the electromagnetic field is used to calculate the transient characteristics of a typical geoelectric model. The sensitivity of non-stationary electromagnetic sounding towards the measurement of induced polarization effects is estimated on the basis of model data analysis. To measure the depths of the polarized layers spatial inversion is applied. **Results.** Variations of the the polarizability coefficient and depth of the polarized layer have been analyzed for one of the 3D TEM sounding areas within the North-West part of the Nepa arch. **Conclusions.** The use of the magnetic source allows to improve the reliability of the studies of conductivity and polarizability of the geological section of the south of the Siberian craton.

Keywords: electrical prospecting, electric and magnetic dipoles, induced polarization, electrical resistivity, automatic inversion

Article info. Received 23 March 2018; accepted for publication 4 June 2018; available online 29 June 2018.

For citation. Pospeev A.V., Murzina E.V., Kompaniets S.V., Emelianov V.S. Capabilities of electromagnetic installations when studying the fields of induced polarization. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopayemykh* = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits, 2018, vol. 41, no. 2, pp. 80–90. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-2-80-90. (In Russian).

Введение

Геоэлектрические условия юга Сибирской платформы определяются древним возрастом осадочных горных пород, высокой степенью их литификации и существенной засоленностью пород, особенно средней части разреза. Карбонатно-галогенный комплекс, сложенный переслаиванием карбонатов и солей, характеризуется крайне высоким поперечным сопротивлением (более 10^7 Ом·м²) и большой величиной поперечной анизотропии [1, 2]. Подобная геоэлектрическая структура осадочного чехла в значительной степени ограничивает возможности зондирования на постоянном токе (вертикальных, дипольных электрических зондирования), су-

щественно осложняет поведение магнитотеллурического поля [3] и предопределяет необходимость применения активных индукционных зондирований, ведущим из которых является метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ).

За исключением территории Присаяно-Енисейской синеклизы и северного склона Непско-Ботубинской антеклизы суммарная проводимость осадочного чехла юга Сибирской платформы составляет 25–100 См, что в целом благоприятно для изучения методом ЗСБ. Верхняя часть геоэлектрического разреза здесь умеренно неоднородна, что позволяет с достаточной для практики точностью использовать одномерную

инверсию данных. Наиболее частой причиной осложнения кривых ЗСБ являются эффекты частотной дисперсии сопротивления – магнитной вязкости и индукционно-вызванной поляризации (ВПИ) пород [4]. Эффекты частотной дисперсии сопротивления особенно заметно проявлены на поздних временах становления поля, где они накладываются на сигналы индукционной природы.

Ранее, когда геофизики не располагали средствами для расчета переходных характеристик с учетом индукционно-вызванной поляризации, ее проявления рассматривались исключительно как помеха, осложняющая изучение распределения «истинной» электропроводности. В этой связи прилагались и до сих пор прилагаются усилия, направленные на снижение или «подавление» эффектов ВПИ [5, 6].

Существует также точка зрения о том, что аномалии поляризационных параметров имеют поисковый интерес, так как и сами залежи углеводородов, и зоны, расположенные над ними, могут обладать повышенной поляризуемостью. В этой связи отметим работы методами электромагнитных зондирований, в которых изучение удельного электрического сопротивления среды носит второстепенный характер, а основное внимание уделяется картированию аномалий ВПИ [7].

С появлением алгоритмов и быстроскорействующих программ, использующих для расчета переходных характеристик поля становления комплексную геоэлектрическую модель (Cole-Cole), влияние полей ВПИ стало поддаваться количественной оценке [8, 9]. На начальном этапе использования комплексных алгоритмов инверсии основное внимание уделялось оценке поляризуемости верхней части разреза, где, согласно гипотезе Пирсона [10], повышение поляризуемости горных пород происходит за счет миграции содержащихся в углево-

дородных флюидах сернистых соединений и их взаимодействия с окислами железа. Однако в значительной части случаев применение подобного подхода приводит к противоречивым данным.

В связи с этим перед авторами встала задача изучить чувствительность переходных характеристик электромагнитного поля при применении разных типов источников к наличию вызванной поляризуемости как в приповерхностных, так и в глубинных слоях разреза.

Постановка задачи

Для изучения пространственно-временных характеристик полей ВПИ проведено моделирование сигналов становления для двух типов установок: магнитной с разносами 0; 0,5 и 1 км (соответственно Qq , $Q500q$, $Q1000q$) и осевой электрической с конфигурацией A1200B900M600N, A1200B1500M600N. Расчеты проводились для установок, наиболее часто применяемых в геоэлектрических условиях юга Сибирской платформы, в частности для магнитной установки размер генераторной петли составил 600×600 м, момент приемной петли – ~ 10000 м².

Расчет переходных характеристик осуществлялся с использованием программных модулей решения прямой задачи становления поля, разработанных А.Е. Каминским [11]. В качестве референтной использовалась геоэлектрическая модель, по проводимости надсолевого, карбонатно-галогенного и подсолевого комплексов близкая к типичной геоэлектрической модели юга Сибирской платформы (таблица).

Отметим, что параметры высокоомных слоев задавались в соответствии со средней суммарной мощностью солей в ангарской, бельской и усольской свитах и с сопротивлением солей 50000 Ом·м.

Расчет синтетических сигналов изначально производился для базовой модели без поляризующегося слоя

Типичная геоэлектрическая модель
Typical geoelectrical model

Номер слоя / Layer no.	Сопротивление ρ , Ом·м / Resistivity ρ , Ohm·m	Мощность слоя h , м / Layer thickness h , m	Коэффициент поляри- зуемости Π / Polarizability coefficient Π	Время релаксации T , с / Relaxation time T , sec	Степень поляризации C / Polarization degree C
1	10	50	0	0,2	0,4
2	200	100	0	0,2	0,4
3	40	200	0	0,2	0,4
4	50000	300	0	0,2	0,4
5	20	100	0	0,2	0,4
6	50000	400	0	0,2	0,4
7	30	150	0	0,2	0,4
8	50000	400	0	0,2	0,4
9	50	250	0	0,2	0,4
10	2000	500	0	0,2	0,4

(Π_0 , рис. 1). Впоследствии каждому из слоев приписывалась поляризуемость. Как показало моделирование, задание поляризуемости в высокоомные слои не приводит к заметному изменению поля становления по сравнению с полем для неполяризующейся модели. Это связано с крайне малой величиной токов, индуцируемых в высокоомных слоях. Для иллюстрации характера проявления процессов ВПИ отобраны результаты расчетов для моделей со значением коэффициента поляризуемости $\Pi = 0,1$ в первом, пятом или девятом слоях (см. рис. 1).

Обсуждение результатов

Сигналы становления, рассчитанные от неполяризующейся модели для электрических и петлевых установок (см. рис. 1, черные кривые), различаются в своих левых и правых частях. Это связано с тем, что на ранних временах поле электрического источника и петлевых установок находится в дальней или промежуточной зоне. Правые ветви сигналов находятся преимущественно в ближней зоне, поскольку здесь сигналы не зависят от геометрического разноса,

и они практически смыкаются.

Используемая программа решения прямой задачи не рассчитывает отдельно индукционные и поляризационные сигналы. Понятно, что на временах, соответствующих эффективной глубине поляризованного слоя, энергия электромагнитного поля затрачивается на возбуждение не только индукционных сигналов, но и поляризуемости разреза. Поэтому оценка «чистых» сигналов ВПИ возможна лишь приближенно на поздних временах зондирования. Для этого может быть рассмотрена разность сигналов, рассчитанных от исходной и поляризованной моделей.

Наиболее сильно вызванная поляризация проявляется при использовании в качестве источника электромагнитного поля заземленного электрического диполя (см. рис. 1). Следует отметить, что электрический питающий диполь является источником сложного типа [12]. В режиме включенного тока происходит гальваническая зарядка поляризующихся элементов разреза. Эффективная глубина исследований при этом определяется разномом осевого дипольного

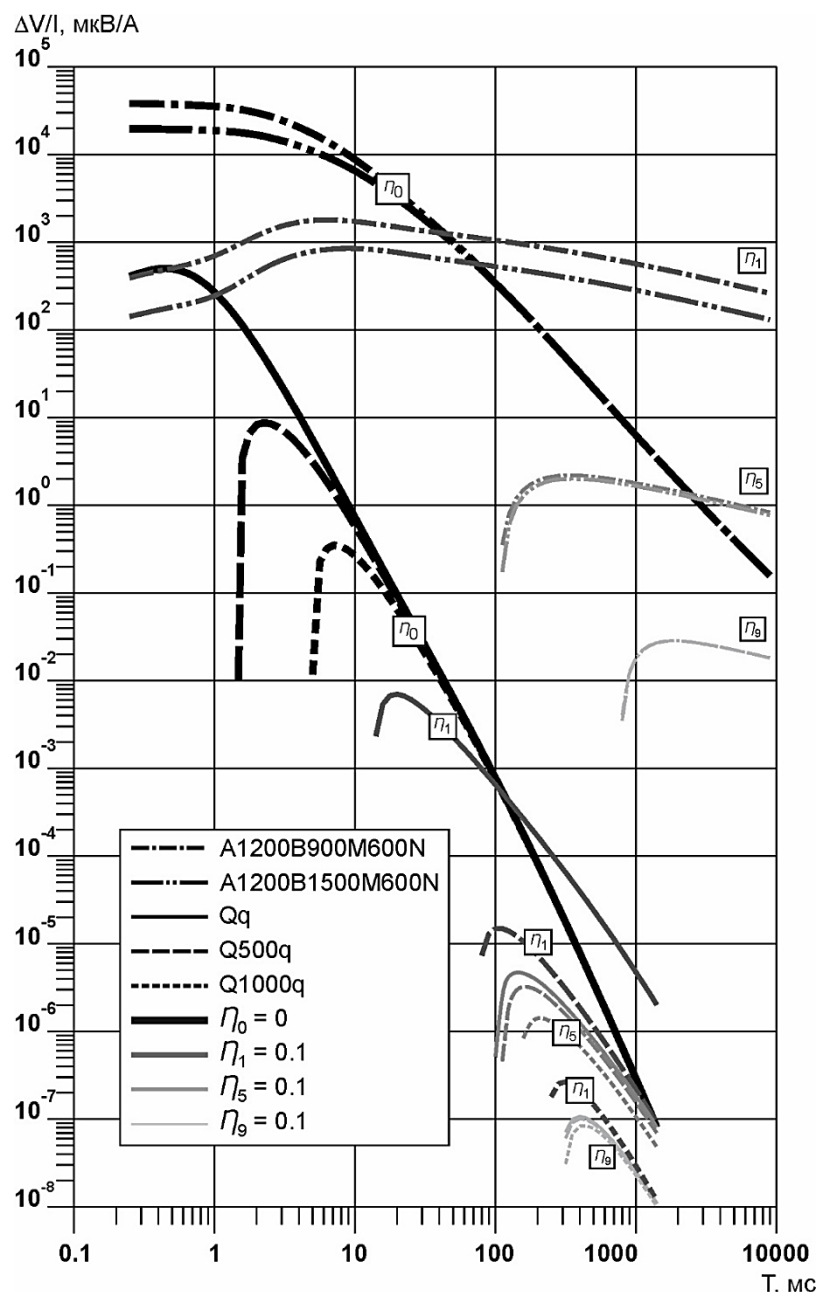


Рис. 1. Нормированные сигналы поля становления $\Delta V/I$ электрической (A1200B900M600N, A1200B1500M600N) и магнитной (Qq, Q500q, Q1000q) установок для неполяризуемого разреза (Π_0) и с поляризуемостью $\Pi = 0,1$ в первом, пятом и девятом слоях (соответственно Π_1, Π_5, Π_9)
Fig. 1. Normalized transient TEM signals of electrical (A1200B900M600N, A1200B1500M600N) and magnetic (Qq, Q500q, Q1000q) units for the non-polarized section (Π_0) and with the polarization of $\Pi = 0.1$ in 1-st, 5-th and 9-th layers (Π_1, Π_5, Π_9 accordingly)

зондирования. Гальванически возбужденное поле ВПИ первого горизонта имеет ту же полярность, что и сигнал индукционной природы, и достаточно большую амплитуду. При поляризуемости пятого и девятого слоев, располо-

женных соответственно в центре и под экраным комплексом, сигналы ВПИ носят индукционно-вызванную природу, они значительно меньше по уровню и характеризуются обратным по отношению к индукционному полю знаком.

Что касается магнитной установки, то возможность изучения поляризуемости горных пород связана с проявлением индукционно-вызванной поляризации [4]. Влияние ВПИ более отчетливо наблюдается на поздних временах зондирования, поскольку поляризационные токи протекают в противоположном направлении быстроисчезающим вихревым токам. Расхождения кривых соосной и разнесенных установок на поздних временах становления в этом случае тем больше, чем ближе к дневной поверхности находится поляризующийся слой (см. рис. 1). Проявление ВПИ в приповерхностных слоях, на кривых кажущегося сопротивления, выглядит как «завышение» левой восходящей части кривой, зарегистрированной на соосном пикете. Так, при расположении зоны ВПИ в первом горизонте с ростом разноса от 0 до 1000 м сигнал ВПИ убывает более чем на три порядка. Если поляризован межэкранный горизонт, сигналы ВПИ различаются примерно на полпорядка. Наконец, при поляризации проводящего горизонта, залегающего на фундаменте, сигналы ВПИ практически сливаются (см. рис. 1).

Различия в пространственно-временном проявлении сигналов ВПИ связаны с их приуроченностью к зоне расположения источника электромагнитного поля. Физически это совершенно понятно, поскольку именно гальванические или индукционно-вызванные токи, протекая в среде, возбуждают поля вызванной поляризации. Из этого следует, что электромагнитные зондирования, использующие дальнюю зону зондирования, почти свободны от влияния ВПИ.

Важно отметить следующую особенность формирования сигналов ВПИ для гальванического источника: наибольшую амплитуду здесь имеют сигналы ВПИ от объектов, расположенных над первым высокоомным экраном. Что касается гальванически возбужден-

ной части сигнала, то на ранних временах она на 1–2 порядка меньше индукционного отклика. На поздних временах отклик гальванически вызванного ВПИ уже преобладает над индукционным сигналом, полностью экранируя его. Если размещать поляризующийся слой ниже первого экрана, амплитуда сигналов ВПИ падает на несколько порядков. На поздних временах сигналы ВПИ пренебрежимо малы по сравнению не только с надэкранными сигналами, но и с индукционным откликом. Таким образом, наличие даже незначительной поляризации надэкранных слоев приводит к существенному экранированию как индукционного отклика разреза, так и вызываемых индукционными токами сигналов ВПИ от глубоких горизонтов.

Практический пример

Изучение возможности картирования глубокозалегающих поляризующихся слоев выполнено на одной из площадей, расположенных в северо-восточной части Непского свода.

Полевые данные ЗСБ получены в ходе решения нефтегазопроисловых геологических задач с помощью цифровой телеметрической электроразведочной станции SGS-TEM [13]. Измерения выполнены по высокоплотной регулярной сети (12 ф. н. на 1 км²). В качестве источника электромагнитного поля использовались генераторные петли размером 600×600 м.

Инверсия данных проводилась в ручном и автоматическом режимах с применением встроенного в программный комплекс SGS-TEM модуля 1D инверсии Model-3. Для учета параметров ВПИ при инверсии кривых ЗСБ в алгоритмах данного программного комплекса используется формула Cole-Cole [13].

В качестве функционала минимизации решения обратной задачи применялась среднеквадратическая невязка между эмпирической и модельной кривыми. Для снижения влияния эквива-

лентности инверсия проводилась с закрепленным (по сейсмическим и буровым данным) структурным каркасом.

Осадочный чехол здесь представлен породами венд-кембрийского возраста общей мощностью до 2 км. Его суммарная проводимость не превышает 30 См, что предопределяет достаточную эффективность использования нестационарных электромагнитных зондирований.

На площади получен полевой материал высокого качества. Его предварительный анализ показывает, что на большей части площади отмечается влияние вызванной поляризуемости разреза, выражающееся в появлении отрицательного прироста проводимости соосных кривых на поздних временах зондирования (рис. 2, *b*). В северной части площади отрицательный прирост характерен уже для всех кривых, зарегистрированных от одного источника (рис.

2, *c*). Для того чтобы учесть подобное поведение переходных характеристик, предложена методика инверсии данных, описанная далее.

Изначально для подбора правой части кривых параметры поляризуемости задавались в верхнюю часть разреза. В автоматическом режиме на основе ранее полученной модели проводимости проводился подбор поляризуемости. Параметры ВПИ последовательно задавались с верхнего по нижний горизонты. В качестве результата выбиралась та модель, средняя суммарная невязка решения которой была минимальна для всех кривых, записанных от одного источника. Таким образом, оценивались не только параметры проводимости разреза, но и глубина поляризуемого слоя. Далее также в автоматическом режиме осуществлялся окончательный подбор параметров электропроводности с минимизацией невязки по каждой кривой.

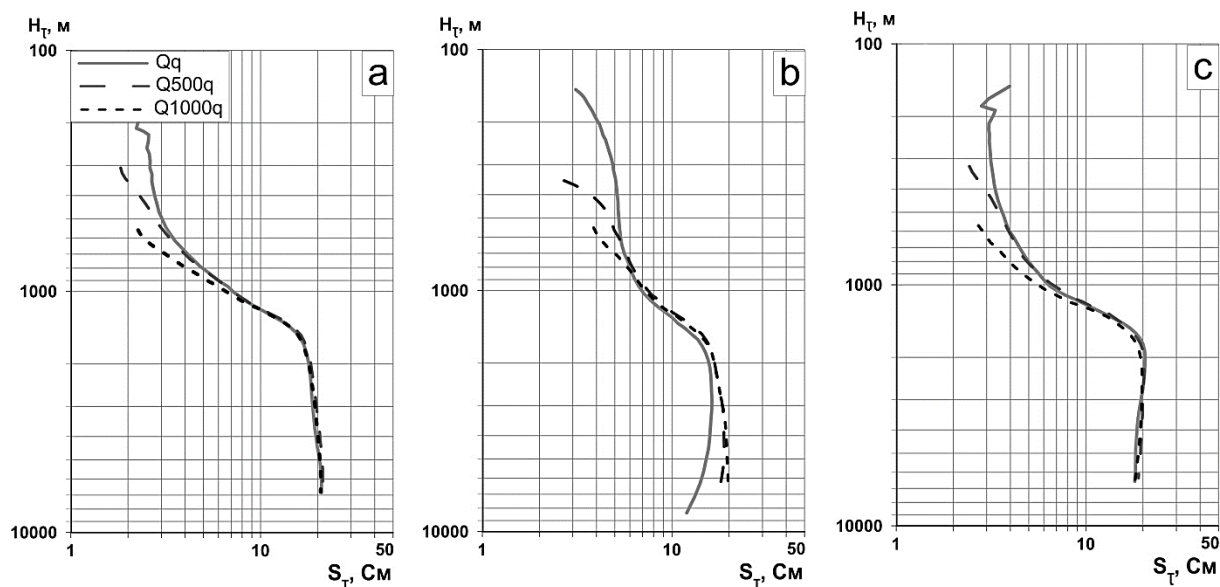


Рис. 2. Форма кривых кажущейся проводимости от кажущейся глубины $S_T(h_T)$ петлевых установок с разносами 0, 500, 1000 м (соответственно Qq , $Q500q$, $Q1000q$) в зависимости от положения поляризуемого слоя:

a – не подверженные влиянию ВПИ; *b* – при положении поляризуемого слоя в отложениях надсолевого комплекса; *c* – при положении поляризуемого слоя в отложениях подсолевого комплекса

Fig. 2. Shape of curves of apparent conductivity $S_T(h_T)$ from apparent depth $S_T(h_T)$ of loop installations with the offsets of 0, 500, 1000 m (accordingly Qq , $Q500q$, $Q1000q$) depending on the location of the polarization layer:

a – not affected by magnetic viscosity and induced polarization; *b* – polarization layer is located in the above-salt formation; *c* – polarization layer is located in the subsalt formation

Результаты использования данной технологии инверсии приведены на рис. 3. Выявленные зоны повышенной поляризуемости в целом распределены в пределах четырех уровней, отвечающих породам верхоленской, литвинцевской и ангарской, бельской и булайской свит и подсолевого комплекса.

При этом наибольшая площадь распространения аномалии ВПИ приурочена к самому верхнему уровню, где присутствуют зоны распространения юрских отложений, в которых отмечается наличие пирита и угленосных пропласт-

ков. В нижней части выделены зоны аномально высокой поляризуемости, пространственно совпадающие с зонами развития нефтегазонасыщенных подсолевых коллекторов. Что касается зон развития аномалий ВПИ в средней части разреза, то они могут иметь формальный характер. В случае наличия аномалий ВПИ одновременно в верхнем и нижнем слоях применяемая методика инверсии даст результат, отнесенный к средней части разреза. Данный вопрос требует дальнейшего изучения.

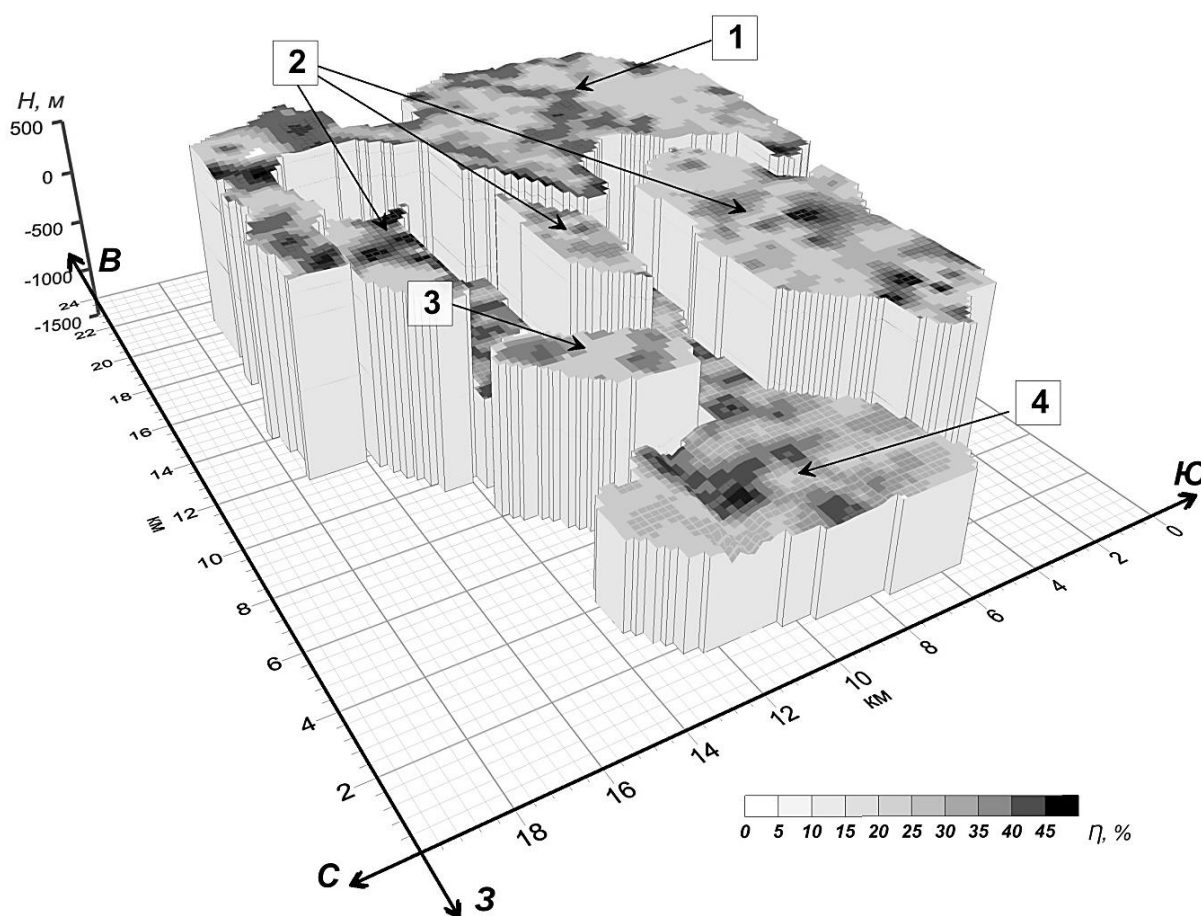


Рис. 3. Трехмерная модель поляризуемости:

1 – отложения верхоленской свиты; 2 – отложения литвинцевской и ангарской свит;
3 – отложения бельско-булайского комплекса; 4 – отложения подсолевого комплекса
H – абсолютная отметка, м; Π – поляризуемость

Fig. 3. 3D polarization model:

1 – Verholenskaya formation; 2 – Litvintsevskaya and Angara formation;
3 – Belsko-Bulaisky formation; 4 – subsalt formation
H – elevation, m; Π – polarizability

Выводы

1. Сигналы ВПИ, возбуждаемые поверхностным нестационарным источником, имеют гальванический (для надэкранных слоев, возбужденных электрическим источником) или индукционно-вызванный характер.

2. При использовании электрического источника в условиях высокого поперечного сопротивления карбонатно-галогенного комплекса верхние поляризованные горизонты оказывают существенное экранирующее влияние на гальванические и поляризационные сигналы более глубокой части разреза.

3. Магнитные многоразносные установки зондирования нестационарным полем в отличие от гальванического источника позволяют объективно изучать как проводимость разреза, так и поляризуемость отдельных слоев при их различном положении в разрезе.

4. Выявленные аномалии поляризуемости верхней части разреза приурочены к зонам развития юрских отложений, в которых по данным изучения керна отмечается присутствие пирита.

5. Выявление аномалий ВПИ в продуктивной части разреза позволяет предполагать, что они могут иметь практический поисковый интерес.

Библиографический список

1. Ваньян Л.Л. О моделях глубинной электропроводности (обзор) // Известия Академии наук СССР. Физика Земли. 1981. № 5. С. 57–66.

2. Поспеев А.В., Пашевин А.М. Результаты моделирования магнитотеллурического поля юга Сибирской платформы // Геология и геофизика. 1990. № 2. С. 78–81.

3. Егоров И.В., Поспеев А.В. Сравнительный анализ источников нестационарного электромагнитного поля // Геофизика. 2015. № 1. С. 26–30.

4. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Импульсная индуктивная электроразведка поляризующихся сред // Геофизический журнал. 2009. Т. 31. № 4. С. 104–118.

5. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Инверсия данных ММП с учетом быстро протекающей индукционно вызванной поляризации: численный эксперимент на основе модели однородного поляризующегося полупространства // Геофизика. 2007. № 1. С. 42–50.

6. Агеенков Е.В. Эквивалентность определения поляризуемости и времени релаксации слоя с частотной дисперсией проводимости // Третья уральская

молодежная научная школа по геофизике: сб. докл. Екатеринбург, 2002. С. 80–84.

7. Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Дифференциально-нормированные методы электроразведки при прямых поисках залежей углеводородов // Геофизика. 1995. № 4. С. 35–42.

8. Cole K.S., Cole R.H. Dispersion and absorption in dielectrics // Journal of Chemical Physics. 1941. Vol. 9. № 4. P. 343–351.

9. 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. № 43. P. 58–609.

10. Pirson S.J. Significant advances in magneto-electric unconventional methods in exploration for petroleum and natural gas. Symp. II-1979 / ed. B.N. Gottlieb. Dallas: Southern Methodist University Press, 1981. P. 169–196.

11. Каминский А.Е. Зондирование становлением поля ZondTEM1d // ZOND [Электронный ресурс]. URL: <http://zond-geo.ru/software/electromagnetic-soundings/zondtem1d> (27.05.2016).

12. Могилатов В.С. Импульсная электроразведка: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2002. 208 с.

13. Агафонов Ю.А., Суров Л.В., Шарлов М.В. Принцип работы и основ-

ные компоненты аппаратно-программного комплекса цифровой телеметрической электроразведочной станции «Пикет» // Российский геофизический журнал. 2006. № 43. С. 98–102.

References

1. Van`yan L.L. On the models of deep electric conductivity (review). *Izvestiya Akademii nauk Soyuza Sovetskikh Sotsialisticheskikh Respublik. Fizika zemli* [Izvestiya. Physics of the Solid Earth], 1981, no. 5, pp. 57–66. (In Russian).

2. Pospeev A.V., Pashevin A.M. Modeling results of the magneto-telluric field of the South of Siberian platform. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 1990, no. 2, pp. 78–81. (In Russian).

3. Egorov I.V., Pospeev A.V. Comparison analysis of transient electromagnetic field sources. *Geofizika* [The Russian Geophysics Journal], 2015, no. 1, pp. 26–30. (In Russian).

4. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. Pulsed induction electrical survey of polarizable media. *Geofizicheskii zhurnal* [Geophysical Journal], 2009, no. 4, vol. 31, pp. 104–118. (In Russian).

5. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. TEM data inversion considering fast-decaying induced polarization: numerical experiment based on homogeneous polarizable half-space model. *Geofizika* [The Russian Geophysics Journal], 2007, no. 1, pp. 42–50. (In Russian).

6. Ageenkov E.V. *Ekvivalentnost` opredeleniya polarizuemosti i vremeni relaksatsii sloya s chastotnoi dispersiei provodimosti* [Determination equivalence of polarizability and time relaxation of a layer with the frequency dispersion of conductivity]. *Tret`ya ural'skaya molodezhnaya nauchnaya shkola po geofizike* [The Third Scientific Youth School on Geophysics]. Ekaterinburg, 2002, pp. 80–84. (In Russian).

7. Legeido P.Yu., Mandel`bua M.M., Rykhliniskii N.I. Differential-normalized electrical measurements in direct exploration of hydrocarbon reservoirs. *Geofizika* [The Russian Geophysics Journal], 1995, no. 4, pp. 35–42. (In Russian).

8. Cole K.S., Cole R.H. Dispersion and absorption in dielectrics. *Journal of Chemical Physics*, 1941, vol. 9, no. 4, pp. 343–351.

9. 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, no. 43, pp. 588–609.

10. Pirson S.J. Significant advances in magneto-electric unconventional methods in exploration for petroleum and natural gas. Symp. II-1979. Dallas: Southern Methodist University Press, 1981, pp. 169–196.

11. Kaminskii A.E. *Zondirovanie stanovleniem polya zondtem1d* [Sounding by the ZondTEM1d field formation]. *ZOND [ZOND]*. Available at: <http://zond-geo.ru/software/electromagnetic-soundings/zondtem1d> (accessed 27 May 2016).

12. Mogilatov V.S. *Impul'snaya elektrorazvedka* [Pulsed electroprospecting]. Novosibirsk: Novosibirsk State University Publ., 2002, 208 p. (In Russian).

13. Agafonov Yu.A., Surov L.V., Sharlov M.V. Operation principle and main components of the hardware and software complex of digital telemetric electroprospecting station "Piket". *Rossiiskii geofizicheskii zhurnal* [Russian Journal on Geophysics], 2006, no. 43, pp. 98–102. (In Russian).

Критерии авторства

Поспеев А.В., Мурзина Е.В., Компаниец С.В., Емельянов В.С. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Pospeev A.V., Murzina E.V., Kompaniets S.V., Emelianov V.S. have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.