

УДК 550.83; 550.371

ПРОЯВЛЕНИЯ И УЧЕТ ИНДУКЦИОННО-ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА ЮГА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ МЕТОДОМ ЗСБ

С.В. Компаниец, Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов

Аннотация. На юге Сибирской платформы методы зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) нашли широкое применение при изучении строения осадочного чехла, поисках и разведке залежей углеводородов и рудных месторождений, а также при решении других геологических задач. Обычно интерпретация данных ЗСБ проводится на основе модели проводящей неполяризуемой среды. Во многих случаях это допустимо, однако результаты измерений, выполненных на некоторых участках с использованием многоразностных установок, не удается объяснить без учета индукционно-вызванной поляризации. Интерпретация данных ЗСБ в рамках горизонтально-слоистой среды, удельное электрическое сопротивление которой описывается формулой Коул-Коул, показала, что поляризуемыми являются осадочные породы верхней части геологического разреза. Поляризуемость связана с пиритизацией пород, а также присутствием в них углистого вещества и/или графитовой минерализации. Приведенные в статье материалы свидетельствуют о том, что при изучении осадочного чехла юга Сибирской платформы методом ЗСБ применение многоразностных установок позволяет распознавать проявления индукционно-вызванной поляризации и давать их интерпретацию в терминах модели Коул-Коул.

Ключевые слова. Метод ЗСБ, индукционно-вызванная поляризация.

Abstract. In the South of Siberian Platform, the TEM sounding method has found wide use in studies of sedimentary basins, search and prospecting of oil and gas fields and ore deposits, and solving other geological problems. Usually, TEM data are interpreted in the context of conductive non-polarizable geological media. In most cases it is a reasonable practice, but TEM responses measured at different spacing between transmitter and receiver loops couldn't be reasonably interpreted without regard for the inductively induced electrical polarization. The inversion of the TEM data in terms of 1D earth with the resistivity described by the Cole-Cole formula has shown that induced polarization effects are associated with near-surface layers rather than with the deep ones. The polarization is due to pyrite, graphite and coal occurring in the near-surface rocks. In studies of sedimentary cover in the South of Siberian Platform with the TEM sounding method the joint measurement with central loop and loop-loop arrays enables one to recognize inductively induced polarization effects and to interpret them in terms of the Cole-Cole model.

Keywords. Inductively induced polarization; TEM sounding.

ВВЕДЕНИЕ. Информативность сейсморазведки, несомненно эффективного метода при поисках залежей углеводородов, снижается из-за особенностей геологического строения. На юге Сибирской платформы это сложное тектоническое строение территории, присутствие в разрезе соляных валов, карбонатных пород и проявления траппового магматизма. Кроме того, многие залежи приурочены к ловушкам, имеющим тектонический и литологический контроль. В таких условиях электроразведка дополняет сейсмические исследования, а иногда является единственным средством изучения осадочного чехла.

С начала 1970-х гг. при нефтепоисковых работах на юге Сибирской платформы (рис. 1) все более широкое применение находит метод зондирования становлением поля в ближней зоне – ЗСБ.

За последнее десятилетие в области аппаратно-методического обеспечения зондирования становлением поля в ближней зоне достигнуты значительные успехи. Так, были разработаны и внедрены цифровые телеметрические измерительные системы нового поколения, а также мощные коммутаторы

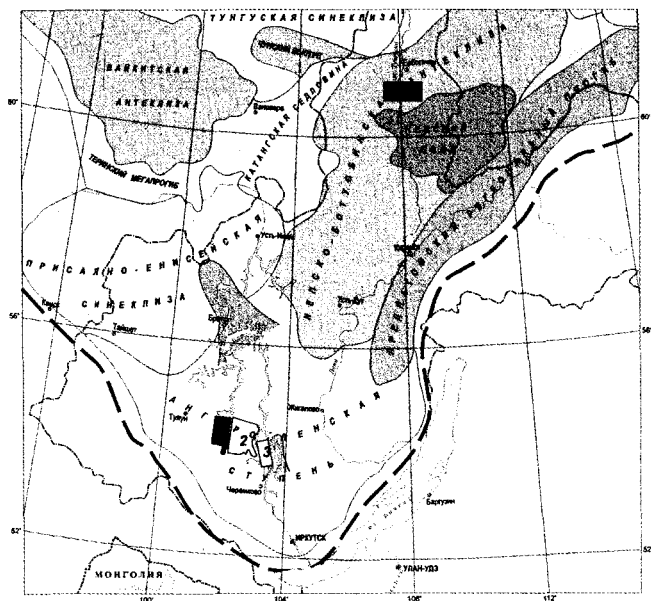


Рис. 1.

Структурно-тектоническая схема юга Сибирской платформы [5] и участки работ методом ЗСБ: 1, 4 – с проявлениями и 2, 3 – без проявлений ВПИ

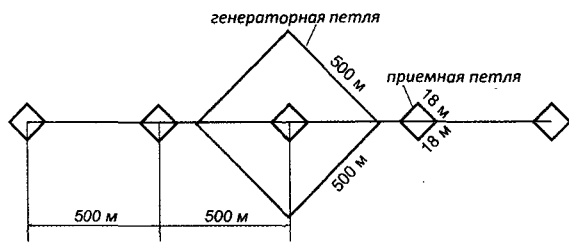


Рис. 2.

Схема многоразносных наблюдений методом ЗСБ

тока [1, 17]. В методике полевых работ важная инновация связана с применением многоразносных установок. В отличие от стандартной методики [7, 13] на каждом пункте зондирования выполняются пятью установками – одной соосной и четырьмя разнесенными, при этом положение генераторной петли остается неизменным (рис. 2). Штатные размеры генераторной петли составляют 500 м × 500 м, разносы – 0 (соосная установка), 500 и 1000 м.

Внедрение аппаратурно-программных комплексов нового поколения сделало возможным измерять сигналы, в т.ч. очень низкого уровня, с высокой точностью, а применение многоразносных систем наблюдения – получать представление о пространственном распределении ЭДС в окрестностях источника. Все это способствовало повышению качества полевых материалов и в конечном счете геологической информативности метода ЗСБ. Вместе с тем вследствие тех же причин при изучении некоторых площадей стали отмечаться «нюансы» переходных характеристик, которые раньше оказывались незамеченными [2, 10].

Примеры проявления индукционно-вызванной поляризации на юге Сибирской платформы

В большинстве случаев кривые ЗСБ, измеренные многоразносными установками на юге Сибирской платформы (в частности, на участках 2 и 3, см. рис. 1), на поздних временах совпадают. На ранних временах переходные характеристики расходятся, однако при этом наблюдается симметрия: при одинаковом разносе регистрируются идентичные кривые ρ_r . Это свидетельствует о близости геоэлектрической модели осадочного чехла к горизонтально-слоистой (одномерной) и отсутствии азимутальной анизотропии удельного электрического сопротивления (УЭС).

Если среда близка к горизонтально-слоистой и азимутально-изотропная, индивидуальная инверсия переходных характеристик, измеренных при разных разносах, дает практически одинаковые геоэлектрические модели, близкие к той, которая получается в результате совместной инверсии. Этот случай иллюстрирует рис. 3, где показаны кривые ρ_r , измеренные на участках 2, 3 на юго-западе Иркут-

ской области, в пределах Ангаро-Ленской ступени, а также соответствующие геоэлектрические модели.

Рис. 4 иллюстрирует иную ситуацию, наблюдавшуюся при работах методом ЗСБ на участках 1 и 4 (см. рис. 1). На поздних временах кривые ρ_r , измеренные разнесенными установками, сливаются. Кроме этого, во всем временном диапазоне кривые ρ_r , измеренные при одинаковом разносе, совпадают, что свидетельствует о близости геоэлектрической модели к горизонтально-слоистой. Однако в отличие от предыдущего случая правая ветвь кривой ρ_r для соосной установки располагается значительно выше по отношению к совпадающим правым ветвям кривых для разнесенных установок. Инверсия данных ЗСБ, измеренных разнесенными установками, дает одну и ту же геоэлектрическую модель, однако она значительно отличается от той, которая получена в результате инверсии данных, измеренных соосной установкой. В этом случае не удастся выполнить совместную инверсию данных, измеренных всеми пятью установками.

Было высказано предположение, что отмеченное расхождение между переходными характеристиками, измеренными симметричной и разнесенной установками, является следствием индукционно-вызванной поляризации (ВПИ). Эффекты ВПИ по сравнению с вкладом вихревых токов быстро убывают при увеличении разноса зондирующей установки [9, 19, 15].

Для проверки этого предположения выполнена инверсия переходных характеристик на основе модели горизонтально-слоистой поляризующейся среды. Учет поляризуемости среды осуществлялся путем использования комплексного, зависящего от частоты удельного электрического сопротивления $\rho^*(\omega)$, описываемого формулой Коул-Коул [20, 18, 14]:

$$\rho^*(\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - \eta \left[1 - \frac{1}{1 + (j\omega\tau)^c} \right] \right\}, \quad (1)$$

где $j = \sqrt{-1}$; ω – круговая частота, рад/с; ρ_0 – удельное сопротивление на постоянном токе, Ом·м; η – поляризуемость, c – показатель степени; τ – время релаксации, с. Диапазон возможных значений параметра η – от нуля до единицы, τ – от нуля до бесконечности.

Подбор геоэлектрических моделей проводился с помощью программы MODEL 3 [17], математическую основу которой образуют программные модули для решения прямой и обратной задач метода ЗСБ с учетом ВПИ [2].

Результаты инверсии переходных характеристик, измеренных на участках 1 и 4 в пределах Ангаро-Ленской ступени и Непско-Ботуобинской антеклизы, приведены на рис. 4б, г. В целом для исследуемых площадей получены 8-10-слойные модели, при этом каждый из слоев соответствует одному из ком-

Рис. 3. «Нормальные» (без проявлений ВПИ) полевые и модельные кривые кажущегося удельного сопротивления и соответствующие геоэлектрические модели: а, в – участок 2, б, г – участок 3

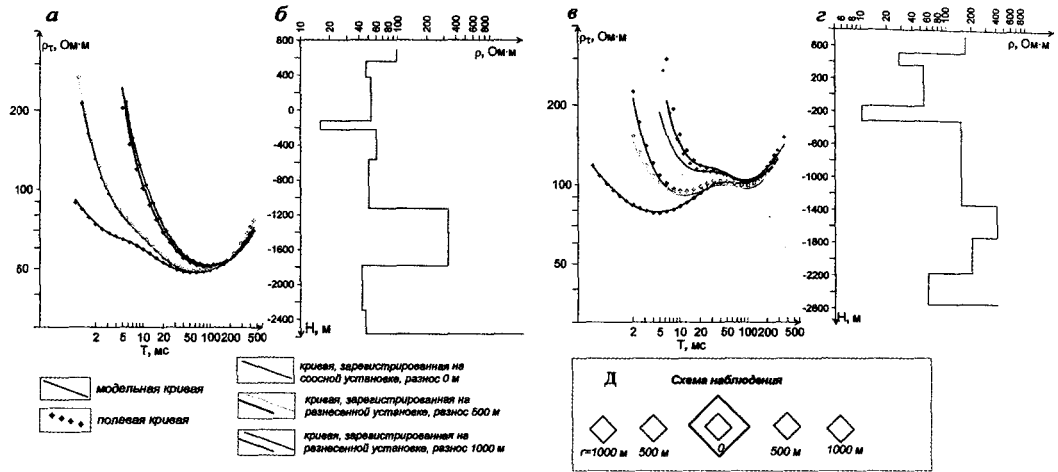
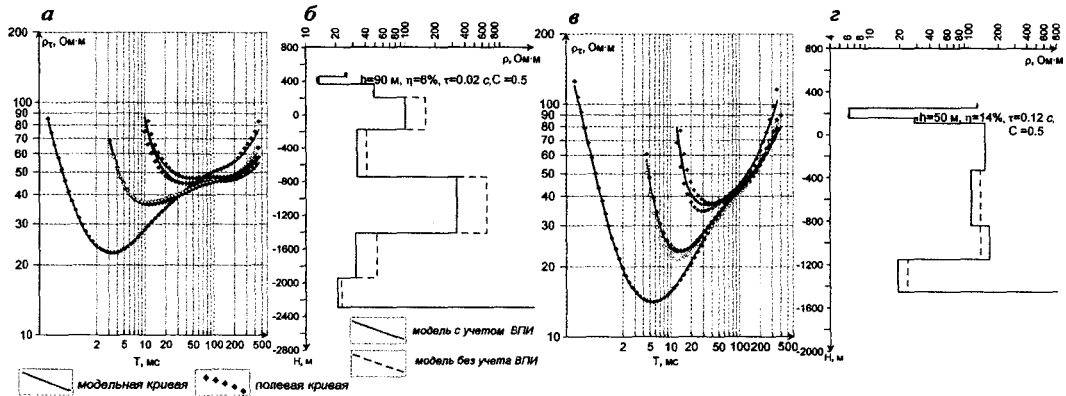


Рис. 4. Полевые и модельные кривые кажущегося удельного сопротивления и соответствующие геоэлектрические модели в случае влияния вызванной поляризации: а, в – участок 1, б, г – участок 4



плексов осадочного чехла. Согласно результатам инверсии, поляризующимися являются верхние – залегающие на глубине не более 300 м – слои. Их удельное электрическое сопротивление составляет от 5 до 170 Ом·м, поляризуемость – от 1 до 16%, время релаксации τ – от 0,02 до 0,15 с, показатель степени $c = 0,5 - 0,6$.

В отличие от того случая, когда инверсия выполнялась в рамках модели проводящей неполяризуемой среды, учет поляризуемости позволил согласовать данные измерений с разнесенными и соосной установками на основе единой геоэлектрической модели.

Обсуждение результатов

Ранее проявления индукционно-вызванной поляризации при работах методом ЗСБ или его аналогов (МПП, ЗМПП) неоднократно отмечались при поисках кимберлитовых трубок в Западной Якутии [4, 11, 19, 15, 16, 6]. Интерпретация индукционных переходных характеристик, измеренных в Якутии на основе модели среды, удельное сопротивление которой описывается формулой Коул-Коул, показала, что поляризационные процессы характеризуются постоянной времени в диапазоне от первых десятков до первых сотен мкс. Как выяснилось, проявления ВПИ связаны здесь с такими явлениями, как диэлектрическая релаксация льда, эффект Максвелла-Вагнера (межповерхностная поляри-

зация) и электрохимическая поляризация в ионно-проводящих мерзлых породах [8]. Характерными особенностями ВПИ в мерзлых породах являются быстрый характер поляризационных процессов и узкое распределение времен релаксации: в большинстве случаев показатель c в формуле Коул-Коул близок к единице.

Обращает на себя внимание тот факт, что как в Якутии, так и на юге Сибирской платформы причиной наблюдаемых эффектов является вызванная поляризация *верхней части разреза*. Однако скорость установления ВПИ на юге Сибирской платформы примерно на три порядка ниже по сравнению с наблюдаемой в Якутии, а времена релаксации распределены в широком диапазоне.

Очевидно, эффекты ВПИ, отмеченные в этих регионах, имеют разную природу. В этой связи представляется интересным обсудить, с чем могут быть связаны проявления ВПИ пород верхней части разреза на юге Сибирской платформы.

Участок 1. Работы методом ЗСБ проводились здесь с целью выявления зон коллекторов, перспективных на обнаружение углеводородов. Общий объем наблюдений – 200 точек, на 40 из которых выполнены измерения соосной, а на остальных – разнесенными установками. Только на 10 точках из 200 нет явных проявлений ВПИ.

Геологическое строение участка типично для юга Сибирской платформы [5]. Залегание пород –

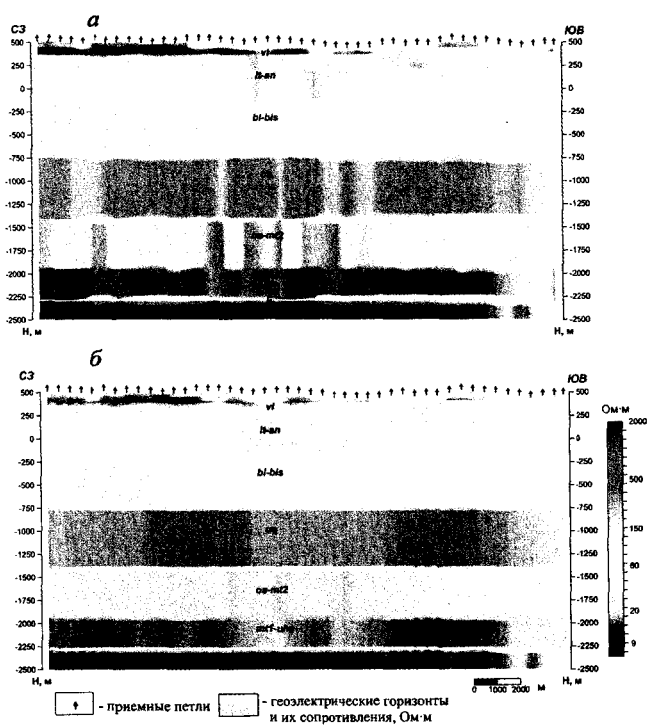


Рис. 5.

Геоэлектрические разрезы, построенные по данным ЗСБ: *а* – инверсия проводилась без учета, *б* – с учетом поляризуемости

горизонтально-слоистое. Разрез осадочного чехла слагают породы венд-кембрийского, кембрийского, ордовикского и юрского возрастов. По составу и свойствам пород осадочный чехол подразделяется на три структурных комплекса: надсолевой, солевой и подсолевой. В пределах двух верхних комплексов выделяются четыре геоэлектрических горизонта, представленных преимущественно терригенными породами надсолевой толщи, карбонатно-галогенными породами литвинцевской, ангарской и бельско-булайской свит.

В нижнем структурном комплексе выделены три геоэлектрических горизонта, представленные отложениями усольской свиты, а также карбонатной и терригенной толщами подсолевых отложений. С последней связаны основные перспективы нефтегазоносности. По данным ЗСБ, в подсолевой толще выделены горизонты-коллекторы, высокая (10–18 см) проводимость которых свидетельствует о возможном водном характере их насыщения.

При сопоставлении распределения поляризуемости и геологической карты было замечено, что повышенные значения поляризуемости отмечаются на участках распространения юрских пород. В связи с проявлениями ВПИ среди отложений юрского возраста особый интерес представляет заларинская свита, в составе которой встречаются пиритизированные аргиллиты. Мощность свиты может достигать 60 м. Повсеместно распространены угленосные формации с проявлениями графитовой и сульфидной минерализации. Кроме этого, согласно

описанию геологической карты масштаба 1:200 000, в кембрийских отложениях нижней подсвиты верхленской свиты отмечаются мергели с включениями кристалликов пирита.

Таким образом, можно предположить, что поляризуемость верхней части разреза связана здесь с вкрапленной сульфидной минерализацией. Это предположение согласуется с результатами, представленными в известной работе [20], где показано, что значения τ от 0,02 – 0,15 с и $c = 0,5$ наблюдаются при концентрациях пирита в осадочных породах около 2–5%.

Участок 4. На данной площади, расположенной в западной части Непско-Ботуобинской антеклизы (см. рис. 1), общий объем наблюдений составил 973 физические точки. Участок отличается сложным тектоническим строением, а также присутствием в разрезе траппов и туфов триасового возраста. Поэтому можно было бы предположить, что расхождения переходных характеристик, измеренных соосной и разнесенными установками, связаны с влиянием неоднородностей. Однако с учетом того, что эти расхождения имеют площадное распространение, причем переходные характеристики, измеренные при одном и том же разnose, совпадают, с большей вероятностью отмеченные эффекты могут быть отнесены на счет ВПИ. В пермских и юрских отложениях, входящих в верхнюю часть разреза, имеются пропластки каменного угля и углистых аргиллитов, с которыми также могут быть связаны проявления вызванной поляризации.

Необходимо отметить, что на геоэлектрических разрезах и картах сопротивления, построенных без учета поляризуемости, появляются «артефакты», которые затрудняют геологическую интерпретацию материалов ЗСБ. Так, на геоэлектрическом разрезе, построенном без учета ВПИ вдоль одного из профилей в пределах участка 1 (рис. 5*а*), на пикетах, где измерения выполнены соосной установкой, наблюдаются субвертикальные зоны повышенного сопротивления. Эти зоны не имеют отношения к геологии – они «появились» потому, что переходные характеристики, измеренные соосной установкой, т.е. с малым разномом, наиболее подвержены влиянию ВПИ. Как можно видеть на рис. 4, правая ветвь кривых кажущегося удельного сопротивления для соосной установки идет выше, чем правые ветви кривых ρ_r для разнесенных установок. При инверсии данных ЗСБ в рамках горизонтально-слоистой модели это «задириание» кривых ρ_r приводит к сильному завышению значений сопротивления слоев по сравнению с истинными. Инверсия на основе модели поляризуемой среды дает разумные в геологическом отношении результаты (рис. 5*б*).

Аналогичным образом при построении карт продольного сопротивления влияние ВПИ приводит

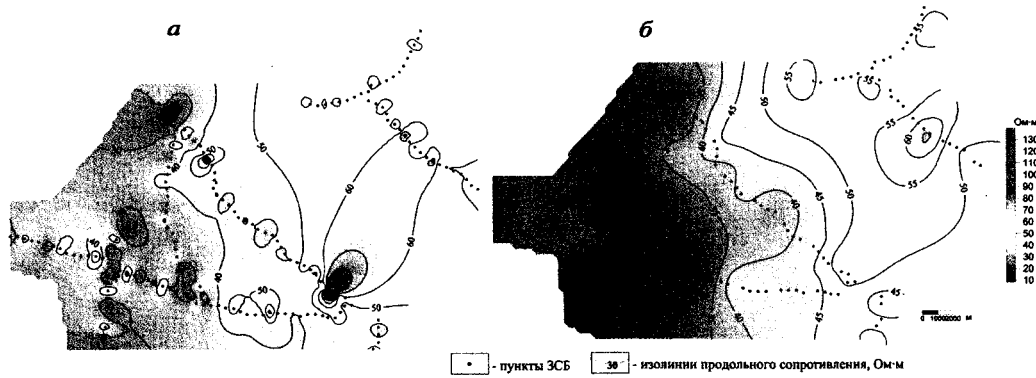


Рис. 6. Карты продольного сопротивления карбонатных отложений подсолевого комплекса: *а* – инверсия проводилась без учета, *б* – с учетом поляризуемости

к появлению множества локальных аномалий. Это иллюстрирует рис. 6а, где приведена карта сопротивления карбонатного подсолевого комплекса (участок 1), представляющего интерес в связи с возможным присутствием коллекторов. Карта построена по результатам инверсии, выполненной без учета ВПИ. Локальные аномалии повышенного сопротивления, соответствующие зондированиям с соосной установкой, не подлежат геологическому истолкованию. Учет ВПИ приводит, во-первых, к исчезновению «точечных» аномалий, во-вторых, к значительному понижению общего уровня сопротивлений на восточном фланге участка (рис. 6б).

В заключение отметим, что первые упоминания и дискуссии о проявлениях медленно устанавливающейся индукционно-вызванной поляризации при измерениях с многоразносными установками содержатся в публикациях [10, 16].

Выводы. При проведении зондирований становлением поля в ближней зоне на юге Сибирской платформы на ряде площадей отмечаются проявления индукционно-вызванной поляризации.

Согласно результатам инверсии данных ЗСБ на основе модели среды, удельное сопротивление которой описывается формулой Коул-Коул, проявления ВПИ связаны с породами верхней части разреза с параметрами: $\rho = 5 \dots 160 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\eta = 1 \dots 14\%$, $\tau = 20 \dots 500 \text{ мс}$, $c = 0,5 \dots 0,6$.

Сопоставление материалов ЗСБ с геологическими картами и разрезами дает основание предположить, что ВЧР является поляризующейся благодаря присутствию сульфидной минерализации, углефицированных пород и траппов.

Инверсия переходных характеристик без учета поляризуемости приводит к появлению на геоэлектрических разрезах и картах сопротивления не существующих в реальности геологических объектов. Учет поляризуемости снимает эту проблему.

Методическим приемом, который позволяет отличать влияние ВПИ от эффектов, создаваемых отклонением среды от горизонтально-слоистой и азимутальной анизотропии сопротивления, является использование многоразносных установок.

В данной статье влияние ВП рассматривается преимущественно как помеха, осложняющая интерпретацию данных ЗСБ проводимой в рамках электропроводности. Однако оценка поляризуемости ВЧР может представлять самостоятельный интерес, например при геологическом картировании и/или поисках нефтегазовых залежей по ореолам сульфидной минерализации, сформировавшейся в результате эпигенетических изменений в перекрывающих залежь породах [12].

ЛИТЕРАТУРА

1. Агафонов Ю.А. Разработка программно-измерительного комплекса для нестационарных электромагнитных зондирований на основе телеметрических систем наблюдения // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск. 2005. 20 с.
2. Антонов Е.Ю. Математическое моделирование квазистационарных электромагнитных полей в диспергирующих и магнитных средах // Автореф. дис... докт. физ.-мат. наук. – Новосибирск. 2011. 32 с.
3. Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Компаниец С.В. Проявления и учет индукционно-вызванной поляризации верхней части разреза Восточной Сибири // ГЕО-Сибирь-2011. Т. 2. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технология поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Ч. 1: Сб. матер. VII Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2011», 19-29 апреля 2011 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГТА, 2011. С. 182–186. ISBN 978-5-87693-438-3 (т. 2, ч. 1).
4. Вопросы поляризации горных пород // Сб. статей под редакцией А.А. Молчанова и В.А. Сидорова. М., 1985, 109 с. Деп. в ВИНТИ. - N 5847-85.
5. Геология нефти и газа Сибирской платформы. / Под ред. А.Э. Конторовича, В.С. Суркова, А.А. Трофимука, М., Недра, 1981, 552 с.
6. Жандалинов В.М. Электрические и электромагнитные зондирования при поисках коренных месторождений алмазов / В.М. Жандалинов. Научно-исследовательское геологоразведочное предприятие АК «АЛРОСА» // Новосибирск: Академическое издательство «Гео». 2011. 275 с. ISBN 978-5-904682-57-6.
7. Захаркин А.К. Методические рекомендации по электро-разведочным работам методом ЗСБ с аппаратурой «ЦИКЛ»: Новосибирск. СНИИГГиМС. 1981. 99 с.
8. Кожевников Н.О. Быстропротекающая индукционно-вызванная поляризация в мерзлых породах // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. №4. С. 527–540.

9. *Кожевников Н.О., Артеменко И.В.* Моделирование влияния диэлектрической релаксации в мерзлых породах на переходную характеристику незаземленной петли // Криосфера Земли. 2004. Т. VIII. №2. С. 30–39.

10. *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. 2 с. ISBN 978-5-88942-096-5.

11. *Митюхин С.И.* О геологической природе знакопеременных переходных процессов в Западной Якутии // Геология и геофизика. 1985. №1. С. 103–106.

12. *Моисеев В.С.* Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей. Новосибирск: Наука. 2002. 136 с.

13. *Рабинович Б.И.* Основы метода зондирования становлением поля в ближней зоне: Конспект лекций. Иркутск: ИПИ. 1987. 52 с.

14. Светов Б.С. Основы геоэлектрики. – М.: Издательство ЛКИ. 2008. 656 с.

15. *Стогний Вас.В.* Импульсная индуктивная электро-разведка при изучении поляризующейся среды криолитозо-

ны Якутской кимберлитовой провинции // Криосфера Земли. 2008. №4. С. 46–56.

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

17. *Шарлов М.В., Агафонов Ю.А., Стефаненко С.М.* Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-TEM и FastSnap. Эффективность и опыт использования // «Приборы и системы разведочной геофизики». Саратов, 2010. №01(31). С. 20–24.

18. *Flis F.M., Newman G.A., Hohman G.W.* Induced-polarization effects in time-domain electromagnetic measurements // Geophysics. 1989. V. 54. Pp. 514–523.

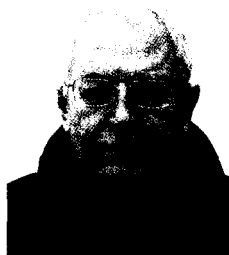
19. *Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu.* Fast-decaying IP in frozen unconsolidated rocks and potentialities for its use in permafrost-related TEM studies // Geophysical Prospecting. 2006. V. 54. Pp. 383–397.

20. *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. V. 43. Pp. 588–609.

РЕЦЕНЗЕНТ – доктор физ.-мат. наук И.Н. Модин

ОБ АВТОРАХ

КОЖЕВНИКОВ Николай Олегович



Главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор. Выпускник физического факультета Иркутского государственного университета. Основные научные интересы – метод переходных процессов, верхняя часть геологического разреза, электрическая и магнитная вызванная поляризация геологических сред, археогеофизика, геофизика криолитозоны. Автор более 60 научных публикаций.

АНТОНОВ Евгений Юрьевич



Заведующий лабораторией геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, кандидат технических наук, доцент. Выпускник механико-математического факультета Новосибирского государственного университета. Основные научные интересы – математическое моделирование нестационарных электромагнитных полей в дисперсных и сложнопостроенных геологических средах. Автор 50 научных публикаций.

КОМПАНИЕЦ Софья Викторовна



Ведущий геофизик ЗАО «Иркутское электроразведочное предприятие». Окончила Иркутский государственный технический университет в 2005 г. Научные интересы – интерпретация данных метода ЗСБ, индукционно-вызванная поляризация. Автор 20 научных публикаций.