

ПОИСК ТАЛИКОВ МЕТОДОМ ЗСБ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ПРОЯВЛЕНИЯ ИНДУКЦИОННО-ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Н.О. Кожевников^{1,2}, Е.Ю. Антонов¹, А.К. Захаркин³, М.А. Корсаков¹

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

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

³Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья,
630091, Новосибирск, Красный просп., 67, Россия

Важнейшим источником водоснабжения в северных регионах являются водонасыщенные талые породы среди мерзлых, называемые таликами. На фоне вмещающих мерзлых пород талики выделяются как зоны повышенной проводимости. Среди электроразведочных методов, которые могут использоваться для поисков таликов, привлекает внимание зондирование становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Одним из важных достоинств метода ЗСБ при изучении мерзлых толщ является отсутствие гальванических заземлений. В статье обсуждаются проблемы и результаты поисков таликов зон методом ЗСБ на территории Тазовского района Ямало-Ненецкого автономного округа. Измеренные здесь индукционные переходные характеристики на ранних временах подвержены сильному влиянию быстро устанавливающейся индукционно-вызванной поляризации. Это делает невозможным изучение верхней части разреза путем интерпретации данных ЗСБ в рамках модели проводящей неполяризуемой среды. Инверсия данных ЗСБ с помощью программы «ТЕМ-IP» на основе модели проводящей поляризуемой среды, удельная электропроводность которой описывается формулой Коул-Коул, позволила решить эту проблему. По данным ЗСБ, геоэлектрическая модель среды в районе исследований является преимущественно трехслойной. Верхний слой мощностью от 100 до 250 м — высокоомный и поляризующийся. Поляризационные параметры слоя являются типичными для мерзлых осадочных пород. Присутствие в нем талика приводит к понижению эффективных сопротивления и поляризуемости слоя, что — как показали результаты работ методом ЗСБ по озерному маршруту и последующего бурения — может быть использовано в качестве поискового признака.

Мерзлота, талик, зондирование становлением поля, индукционно-вызванная поляризация, интерпретация.

TEM SURVEYS FOR SEARCH FOR TALIKS IN AREAS OF STRONG FAST-DECAYING IP EFFECTS

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

Lenses of water-saturated unfrozen rocks (taliks) in permafrost are important sources of freshwater in high-latitude regions. Taliks stand out against the host frozen rocks in much lower resistivity and thus are detectable by resistivity surveys. TEM soundings are especially efficient in this application as they can go without galvanic grounding, have small offsets, and are sensitive to buried conductors. Early-time TEM data in the Taz area of the Yamal-Nenets district bear strong effects of fast-decaying inductively induced polarization (IP), which rules out the use of nonpolarizable earth assumption for their interpretation. The TEM responses are inverted by means of the TEM-IP software using the model of a polarizable earth with Cole–Cole complex frequency-dependent conductivity. The resulting earth model mainly includes three layers, with a 100 to 250 m thick highly resistive polarizable upper layer. The polarization parameters of the layer (chargeability, time constant and exponent) are typical of frozen sedimentary rocks, while the presence of a talik reduces notably the effective resistivity and chargeability. This feature can be used as a guide to taliks, as it was confirmed by TEM surveys and subsequent drilling.

Permafrost, talik, TEM surveys, fast-decaying induced polarization, inversion

ВВЕДЕНИЕ

Основным источником водоснабжения в северных районах являются водонасыщенные талые породы среди мерзлых, называемые таликами. При поисках и изучении таликов ведущая роль отводится электроразведке методами сопротивлений [Огильви, 1990]. Талики, связанные с крупными водотоками, отражаются на региональных геоэлектрических разрезах, которые строят по данным ВЭЗ с целью общего изучения мерзлотных толщ либо в связи со структурными исследованиями. Основным инструментом

для поиска и картирования таликов при их относительно неглубоком залегании является многогранное электропрофилирование. К недостаткам методов сопротивлений относится необходимость осуществлять гальванический контакт электродов с землей, что в условиях, когда приповерхностные слои находятся в мерзлом состоянии, требует больших затрат времени и труда.

Поэтому при поисках таликовых зон привлекают внимание индукционные зондирования методом становления поля в ближней зоне (ЗСБ). Наряду с отсутствием заземлений важным преимуществом метода ЗСБ является возможность использовать установки, разнос которых значительно меньше глубины зондирования. Благодаря этому метод ЗСБ характеризуется высокой локальностью исследований, намного превышающей таковую в методе ВЭЗ, где, как известно, разнос установки должен в несколько раз превышать глубину зондирования [McNeill, 1980; Рабинович, 1987]. Другое преимущество метода ЗСБ связано с его высокой чувствительностью по отношению к проводникам, перекрытым слабопроводящими экранами [Матвеев, 1974; Артамонова и др., 2013]. Поскольку талые породы по сравнению с мерзлыми являются хорошо проводящими, возможности метода переходных процессов при поисках таликов оцениваются как высокие [Стогний, 2003].

Вместе с тем при использовании ЗСБ в условиях криолитозоны существует проблема, связанная с эффектами индукционно-вызванной поляризации — ВПИ, которая по сравнению с изучаемой традиционным методом ВП является быстро устанавливающейся. Эффекты ВПИ проявляются в виде нарушения монотонности переходных характеристик (вплоть до изменения полярности ЭДС) во временном диапазоне от первых десятков до первых сотен микросекунд [Вопросы..., 1985; Кожевников и др., 1995; Крылов, Бобров, 2002; Стогний, 2008]. Во избежание ошибок геологической интерпретации инверсию таких переходных характеристик необходимо проводить с учетом поляризуемости геологической среды.

В настоящее время известны примеры интерпретации данных ЗСБ в северных районах с учетом эффектов ВПИ [Крылов, Бобров, 2002; Kozhevnikov, Antonov, 2006, 2008, 2012; Стогний, 2008], однако проблема проявления индукционно-вызванной поляризации в связи с поисками таликов обсуждалась лишь в кратких научных сообщениях [Кожевников и др., 2012; Агеев, 2012]. В настоящей статье рассматриваются результаты применения метода ЗСБ для поисков таликов в заполярной тундре с целью решения проблем водоснабжения.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА РАБОТ

Участок работ находится на территории Тазовского района Ямало-Ненецкого автономного округа, в пределах Обь-Тазовского артезианского бассейна, который подразделяется на два гидрогеологических этажа, различающихся по условиям залегания, формирования и режиму подземных вод, а также по химическому и газовому составам. Мощность верхнего наиболее изученного гидрогеологического этажа достигает 300 м, но в основном колеблется от 50 до 250 м. В нем выделяются три водоносных горизонта: четвертичный, миоценовый и эоцен-олигоценый.

Для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения широко используется четвертичный водоносный горизонт, который на территории округа распространен практически повсеместно. Району свойственны сплошные многолетнемерзлые породы, поэтому четвертичный водоносный горизонт на этой территории заморожен практически на всю мощность. Исключения составляют участки талых пород, развитые под руслами крупных непромерзающих рек и озер [Иванов, Бешенцев, 2005].

В геоморфологическом отношении изучаемая территория представляет собой равнинные участки тундры, перемежающиеся с заболоченными понижениями. Геологическая изученность района слабая. Для участка работ отсутствуют архивные данные, характеризующие геолого-литологический или геолого-геофизический разрез в интервале глубин от дневной поверхности до ≈ 150 м. Известно лишь, что верхняя часть разреза сложена песками, глинами и «переходными разностями» — песками с разным содержанием глинистой фракции. Ранее поиски пресных подземных вод на этой территории не проводились.

МЕТОДИКА РАБОТ

Работы методом ЗСБ проведены под руководством А.К. Захаркина с аппаратурой «ЦИКЛ-7» производства фирмы «Цикл-Гео» (г. Новосибирск) [Секачев и др., 2006]. В качестве приемника использовался индукционный датчик ПДИ-50 с эффективной площадью 2500 м² [Захаркин, 1998]. Ток в генераторной петле составлял 7А, что при штатно используемой генераторной петле размером 35 м × 35 м обеспечивало максимальную глубину исследований зондирований порядка 300 м.

Поисковыми работами предшествовали опытно-методические, которые проводились на одном из водораздельных участков (рис. 1). Сначала несколько зондирований (ЗСБ 6—ЗСБ 9) были выполнены симметричной (соосной) установкой с генераторной петлей размером 70 м × 70 м. Соседние пункты ЗСБ располагались здесь на расстоянии 250 м один от другого. Вследствие влияния ВПИ на переходные

Рис. 1. Схема расположения точек ЗСБ.

1 — пункты ЗСБ и их номера.

характеристики, измеренные соосной установкой, отмечался широкий (от ≈ 30 до ≈ 300 мкс) интервал отрицательной ЭДС. В дальнейшем поисковые работы выполнялись разнесенной установкой с генераторной петлей размером $35 \text{ м} \times 35 \text{ м}$. Расстояние между центрами генераторной петли и датчика (разнос) составляло 45 м. Использование разнесенной установки позволило уменьшить влияние ВПИ, т.е. перераспределить вклады поляризационного и индукционного процессов в пользу последнего, сузив тем самым временной интервал, в пределах которого интерпретацию переходных характеристик невозможно выполнить в рамках модели проводящей неполяризующейся среды.

Поисковые маршруты с шагом 100 м прошли по двум профилям — речному и озерному (см. рис. 1). Измерения на речном профиле (ЗСБ 69—200) были выполнены по руслу замерзшей реки. Озерный профиль (ЗСБ 209—284) меридионального направления прошел через три небольших торфяных озера и одно более протяженное с размерами $2800 \times 1600 \text{ м}$, расположенные к востоку от речного маршрута.

Анализ результатов контрольных наблюдений показал, что наибольшие (10—30 % и более) расхождения наблюдались на самых ранних (менее 20—30 мкс) временах. Кроме того, значительные расхождения имели место на временах 100—200 мкс в узкой области, где происходит смена полярности ЭДС, и сигнал очень быстро изменяется во времени.

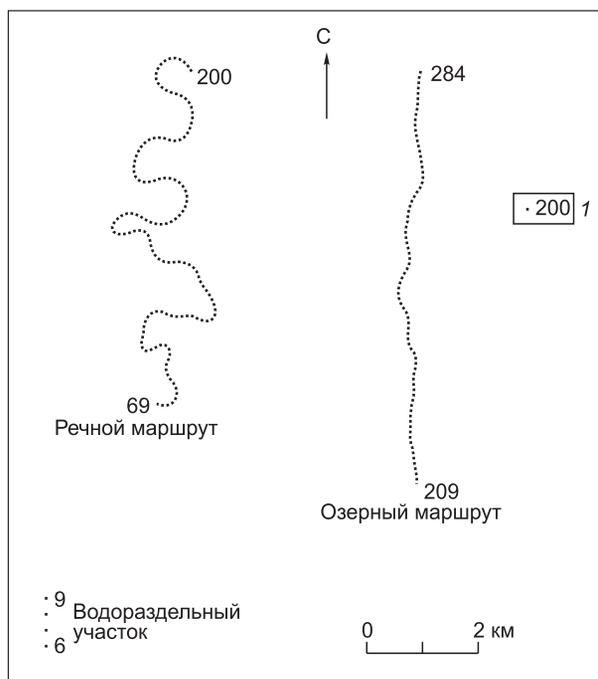
ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА ЗСБ ПРИ ПОИСКАХ ТАЛИКОВ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Благодаря измерениям с разнесенной установкой удалось ослабить влияние ВПИ. Это позволило с использованием программы «ПОДБОР» [Могилатов и др., 2007] выполнить инверсию правых участков переходных характеристик в рамках модели проводящей горизонтально-слоистой модели среды и изучить геоэлектрический разрез до глубин первые сотни метров. Однако в большинстве случаев даже при использовании разнесенной установки проявления ВПИ не позволяли, оставаясь в рамках модели неполяризующейся среды, выполнить инверсию левых, т.е. измеренных на ранних временах, участков переходных характеристик, что препятствовало изучению верхней части разреза (ВЧР), которая при поисках таликов представляла наибольший интерес. В этой ситуации единственный способ оценки геоэлектрических параметров ВЧР заключался в инверсии индукционных переходных характеристик с учетом ВПИ. Отметим, что к моменту написания статьи система «ПОДБОР» была доработана ее авторами: новая версия программы позволяет проводить интерпретацию данных ЗСБ с учетом индукционно-вызванной поляризации.

Как известно, талые неконсолидированные породы отличаются от тех же пород в мерзлом состоянии, во-первых, более низким сопротивлением и, во-вторых, отсутствием или очень слабым проявлением быстропотекающей вызванной поляризации [Кожевников и др., 1995, 2012; Агеев, 2012; Kozhevnikov, Antonov, 2012]. Поэтому логично было предположить, что талик в толще высокоомных поляризующихся пород должен проявляться как неполяризующийся слой пониженного сопротивления.

Интерпретации массовых данных ЗСБ с учетом ВПИ предшествовал этап математического моделирования. В рамках этого этапа, основываясь на обобщенной геоэлектрической модели, мы попытались ответить на вопрос, возможно ли благодаря учету ВПИ повысить геологическую информативность метода ЗСБ при поисках таликов. Затем была проведена инверсия полевых данных ЗСБ с учетом ВПИ и дана их геологическая интерпретация.

Для расчета переходных характеристик и инверсии данных ЗСБ использовалась программа «ТЕМ-IP» [Антонов и др., 2010; Корсаков и др., 2013], позволяющая решать прямые и обратные задачи ЗСБ в классе моделей горизонтально-слоистой проводящей и поляризующейся среды. Учет ВПИ осуществ-



влялся путем использования комплексной, зависящей от частоты удельной электропроводности $\sigma^*(\omega)$, задаваемой формулой Коул-Коул:

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

где $j = \sqrt{-1}$, σ_0 — удельная электропроводность на постоянном токе (См/м), η — поляризуемость ($0 \leq \eta \leq 1$), c — показатель степени ($0 \leq c \leq 1$), τ — время релаксации (с).

При инверсии данных ЗСБ обратная задача решалась путем отыскания набора параметров из пространства модельных данных \mathbf{M} , обеспечивающего минимум целевой функции $\varphi(\mathbf{P})$:

$$\varphi(\mathbf{P}) = \left\{ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left[\frac{\varepsilon^{\text{эксп.}}(t_i) - F_{\mathbf{P}}(t_i)}{\delta(t_i) \varepsilon^{\text{эксп.}}(t_i)} \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

где t_i — временная задержка с номером i , N — общее количество временных задержек; $\varepsilon^{\text{эксп.}}(t_i)$ — измеренное, или экспериментальное значение ЭДС на i -й задержке; $F_{\mathbf{P}}$ — оператор прямой задачи; $\delta(t_i)$ — относительная погрешность измерений для временной задержки t_i . Набор модельных параметров образует $\mathbf{P} = (\sigma_j, h_j, \eta_j, \tau_j, c_j) \Big|_{j=1, M}$, где M — общее число слоев, σ_j — проводимость, h_j — мощность, η_j — поляризуемость, τ_j — время релаксации, c_j — показатель степени j -го слоя. Для минимизации функционала (2) использовался модифицированный метод Нелдера—Мида [1965].

Система «ТЕМ-IP» представляет собой комплекс программ для интерпретации данных импульсной индуктивной 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 [Корсаков и др., 2013].

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.

Решение прямых задач для установок «петля-петля» выполняется модулем Unv_QQ [Кожевников, Антонов, 2007, 2009; Kozhevnikov, Antonov, 2008]. Алгоритм прямой задачи, решаемой методом Фурье, содержит несколько ресурсоемких циклов (до 99.5 % расчетного времени), которые были распараллелены, что позволило добиться ускорения расчетов, пропорционального количеству используемых процессоров.

Прежде всего, мы попытались путем решения прямой задачи оценить порядок величины тех изменений, которые происходят с переходной характеристикой при появлении в мерзлой толще талика. При этом за основу принималась референтная модель среды без талика, для нее рассчитывалась переходная характеристика. Затем в среду «помещался» талик, т.е. неполяризующийся слой пониженного сопротивления, после чего снова выполнялся расчет переходной характеристики. Наконец, на основе сравнения переходных характеристик оценивался эффект талика.

Для построения референтной модели были использованы данные опытно-методических работ на водоразделе. Основания для такого выбора заключались в следующем. Во-первых, с большой вероятностью можно было предположить, что на этом участке нет таликов. Во-вторых, здесь использовалась соосная установка, измерения с которой подвержены наиболее сильному влиянию ВПИ, что являлось благоприятной предпосылкой определения поляризационных параметров, необходимых для построения референтной модели.

На рис. 2 показаны типичные полевые и модельные, т.е. найденные в результате инверсии, переходные характеристики. На самых ранних (меньше первых десятков микросекунд) временах качество подбора нельзя признать удовлетворительным; в остальной части временного диапазона оно оценивается как хорошее или очень хорошее.

Модели, найденные в результате инверсии, сведены в таблицу. Чтобы проиллюстрировать проявления эквивалентности, для ЗСБ 7—9 приведены по два варианта моделей, которые одинаково хорошо объясняют экспериментальные данные. Как нетрудно видеть, геоэлектрический разрез может быть представлен трехслойной моделью. Верхний слой высокого (порядка 10^3 Ом·м) сопротивления является поляризующимся с параметрами: $\eta = 0.6$, $\tau = 150$ мкс, $c = 1$. Такой набор параметров является типичным для мерзлых осадочных пород [Kozhevnikov, Antonov, 2006, 2008, 2012; Стогний, 2010]. 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 значительных отрицательных температурах не замерзает. Сопротивление основания в среднем составляет около 15 Ом·м. Скорее всего, это тоже глины.

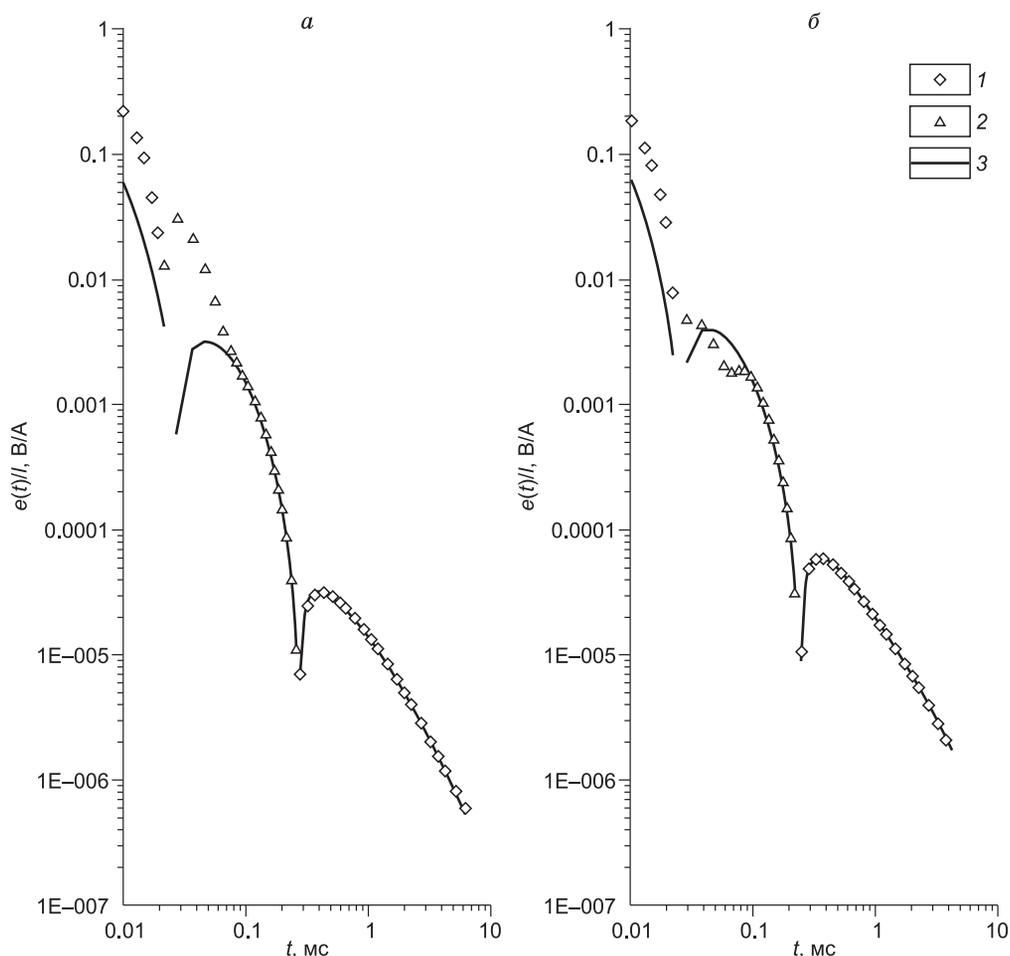


Рис. 2. Экспериментальные (1, 2) и модельные (3) переходные характеристики, водораздельный участок.

a — ЗСБ 6, *б* — ЗСБ 8. 1, 2 — положительные и отрицательные участки переходных характеристик соответственно. Установка: генераторная петля размером 70 м × 70 м, в центре которой располагается индукционный приемный датчик с эффективной площадью 2500 м². Подбор осуществлялся в рамках модели горизонтально-слоистой проводящей и поляризующейся среды.

На рис. 3, *a* приведена трехслойная геоэлектрическая модель с указанными выше параметрами, она может быть использована в качестве референтной при оценке эффектов, создаваемых присутствием талика в верхнем слое. При появлении талика модель становится пятислойной (см. рис. 3, *б*). Талик мощностью h_2 характеризуется пониженным сопротивлением (см. рис. 3, *б*, $\rho_2 = 200$ Ом·м) и нулевой поляризуемостью.

Рис. 4 иллюстрирует изменения переходной характеристики в зависимости от удельного электрического сопротивления талика. При расчетах было принято, что кровля талика располагается на глубине 50 м, а его мощность составляет 50 м. Расчет переходных характеристик выполнен для следующих значений удельного сопротивления ρ_2 талика: 10, 20, 50, 100, 200, 500 и 10³ Ом·м. Тем самым были «охвачены» талики с разной пористостью, минерализацией и т.п. параметрами резервуара. Для сравнения здесь же приведена переходная характеристика для референтной модели.

Как нетрудно видеть, при низком (порядка первых десятков ом на метр) удельном электрическом сопротивлении талика имеют место существенные — особенно в диапазоне времен от первых десятков до первых сотен микросекунд (см. рис. 4, *б*) — отличия переходных характеристик по сравнению с той, которая наблюдается в присутствии референтной модели. В частности, ЭДС переходного процесса не изменяет полярность, что может рассматриваться в качестве поискового признака. При повышении сопротивления талика различие между переходными характеристиками для моделей с таликом и без него уменьшается.

Рис. 5 иллюстрирует влияние на ЭДС переходного процесса мощности талика. При расчетах было принято, что $\rho_2 = 200$ Ом·м, а h_2 изменяется от 5 до 100 м. Как и в предыдущем случае, глубина h_1 до

Результаты инверсии переходных характеристик, измеренных на водораздельном участке

Параметр	ЗСБ 6	ЗСБ 7	ЗСБ 7	ЗСБ 8	ЗСБ 8	ЗСБ 9	ЗСБ 9	Среднее
ρ_1 , Ом·м	1600	470	1420	515	1690	765	1470	1100
η_1	0.71	0.45	0.73	0.46	0.74	0.49	0.65	0.60
τ_1 , мкс	177	103	190	91	188	101	148	140
c_1	1	1	1	1	1	1	1	1
h_1 , м	170	132	155	129	140	145	147	145
ρ_2 , Ом·м	2.4	8.2	1.5	8.3	2	5.9	4.7	4.7
h_2 , м	15.7	127	10.5	121	6.8	53.4	32.9	50
ρ_3 , Ом·м	15	25	14	24	8.8	12	9.8	16
S_2 , См	6.5	16	7	15	3.4	9.1	7	9

Примечание. Установка: генераторная петля размером 70 м × 70 м, в центре которой располагался индукционный приемный датчик с эффективной площадью 2500 м².

кровли талика равна 50 м. Изменение мощности талика — особенно в диапазоне от 50 до 100 м — оказывает слабое влияние на измеряемый сигнал. Тем не менее в области минимума (см. рис. 5, б) отличия переходной характеристики по сравнению с наблюдаемой в присутствии референтной модели достаточны для того, чтобы их можно было зарегистрировать современной аппаратурой для метода ЗСБ.

Для того чтобы выяснить, какие параметры геоэлектрического разреза и с какими погрешностями могут быть определены путем инверсии индукционных переходных характеристик, авторами статьи проведен численный эксперимент, аналогичный описанному в работах [Кожевников, Антонов, 2007, 2009, 2010; Kozhevnikov, Antonov, 2008]. Эксперимент был спланирован и проведен так, чтобы он имитировал «реальность». Один из соавторов настоящей статьи (в дальнейшем соавтор № 1) сформировал набор исходных геоэлектрических моделей, рассчитал для них переходные характеристики и добавил к ним помехи; другой соавтор (в дальнейшем соавтор № 2) выполнил инверсию псевдоэкспериментальных переходных характеристик в рамках горизонтально-слоистой проводящей поляризующейся модели.

Расчет переходных характеристик был выполнен для моделей с таликом различной мощности: $h_2 = 0, 5, 10, 20, 50, 75$ и 100 м. Очевидно, при $h_2 = 0$ «получается» трехслойная модель без талика, которая в контексте настоящей статьи используется как референтная (см. рис. 3, а). Модели с таликом мощностью 5, 10, 20, 50 и 75 м пятислойные (см. рис. 3, б). Последняя из перечисленных моделей ($h_2 = 100$ м) состоит из четырех слоев. Первая ($h_2 = 0$) и последняя ($h_2 = 100$ м) модели могут рассматриваться как частный или «вырожденный» вариант более общей пятислойной.

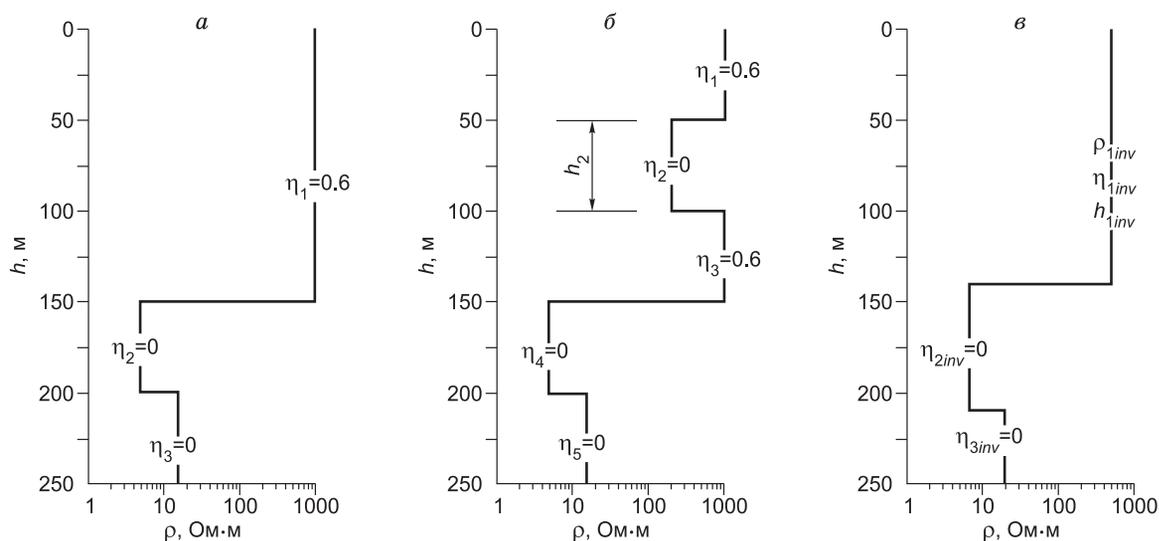


Рис. 3. Геоэлектрические модели.

а — референтная, без талика — по данным инверсии переходных характеристик, измеренных соосной установкой на водораздельном участке; б — с таликом в верхней части разреза (в верхней поляризующейся толще); в — найденная в результате инверсии в предположении, что модель трехслойная, при этом талик оказывает влияние на эффективные параметры верхнего слоя (ВЧР).

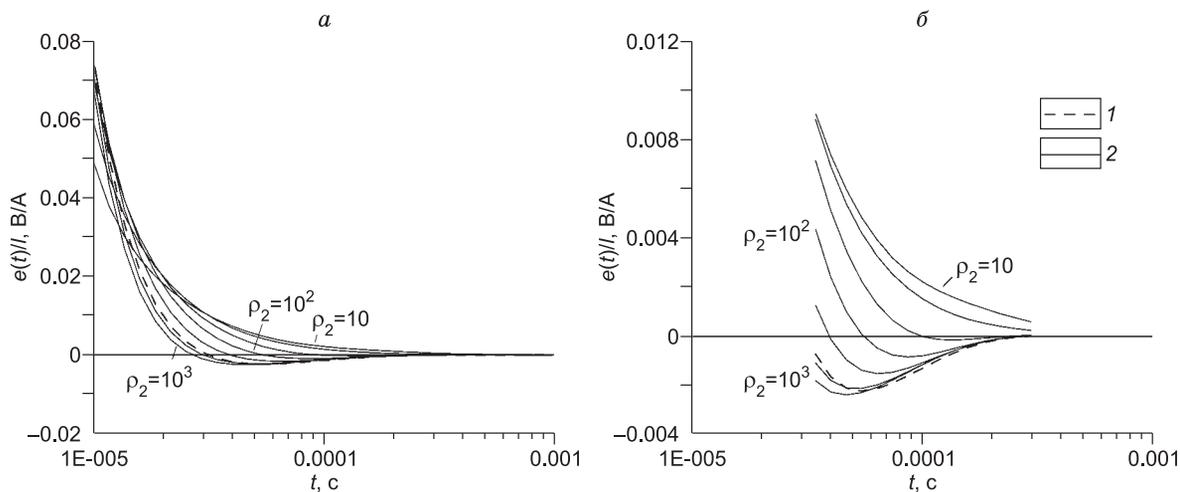


Рис. 4. Влияние удельного электрического сопротивления талика на переходные характеристики.

a — общий вид графиков; *б* — с растянутым вертикальным масштабом в области, где наиболее заметен эффект присутствия талика. 1 — референтная модель, 2 — талик: $h_2 = 50$ м, $\rho_2 = 10\text{--}10^3$ Ом·м.

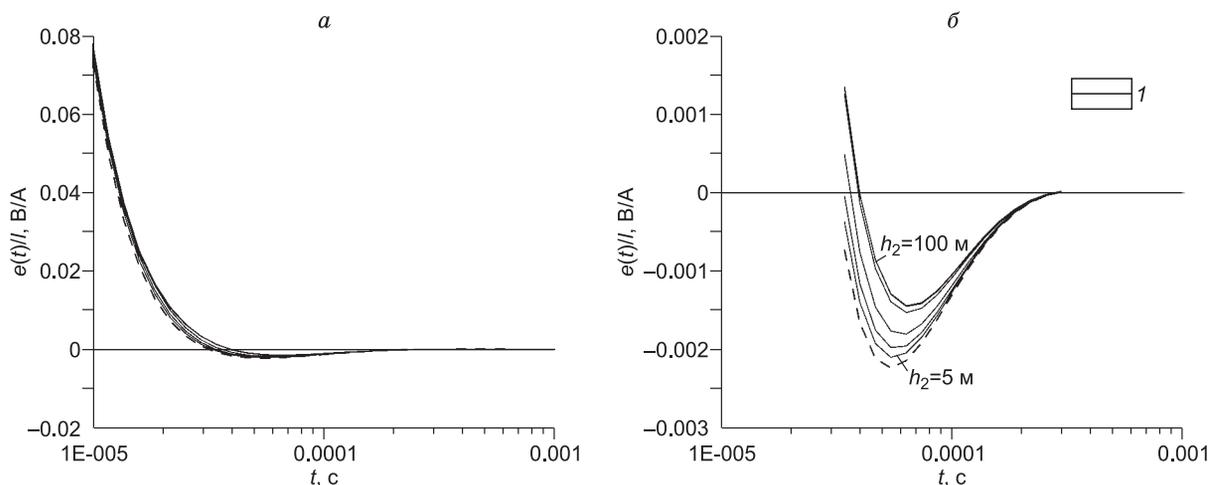


Рис. 5. Влияние мощности талика на переходные характеристики.

a — общий вид графиков; *б* — с растянутым вертикальным масштабом в области, где наиболее заметен эффект присутствия талика. 1 — талик: $h_2 = 5\text{--}100$ м, $\rho_2 = 200$ Ом·м. Остальные усл. обозн. см. на рис. 4.

При расчетах было принято, что суммарная мощность мерзлых поляризующихся пород, в которые «вставлен» талик, составляет 150 м, сопротивление мерзлых пород $\rho_1 = \rho_3 = 10^3$ Ом·м, поляризуемость $\eta_1 = \eta_3 = 0.6$, постоянная времени $\tau_1 = \tau_3 = 150$ мкс, показатель степени $c_1 = c_3 = 1$. Ниже залегает неполяризующийся слой мощностью $h_4 = 50$ м с УЭС $\rho_4 = 5$ Ом·м, он подстилается неполяризующимся основанием с УЭС $\rho_5 = 15$ Ом·м. Удельное электрическое сопротивление талика $\rho_2 = 200$ Ом·м, поляризуемость $\eta_2 = 0$.

Эксперимент включал три этапа.

1. Инверсию псевдоэкспериментальных переходных характеристик на основе референтной или «базовой» трехслойной модели с поляризующимся верхним слоем. В этом случае при $h_2 = 5, 10, 20, 50$ и 75 м в результате инверсии были определены параметры обобщенного слоя, эквивалентного трем верхним слоям пятислойной модели, а при $h_2 = 100$ м — двум верхним слоям четырехслойной.

2. Соавтору №2 было сообщено, что в верхний поляризующийся слой «вставлен» неполяризующийся слой-талик.

3. Интерпретатору были дополнительно сообщены сопротивление мерзлых пород, в которые «вставлен» талик ($\rho_1 = \rho_3 = 10^3$ Ом·м), и суммарная мощность верхней толщи $h_{1,2,3} = h_1 + h_2 + h_3 = 150$ м.

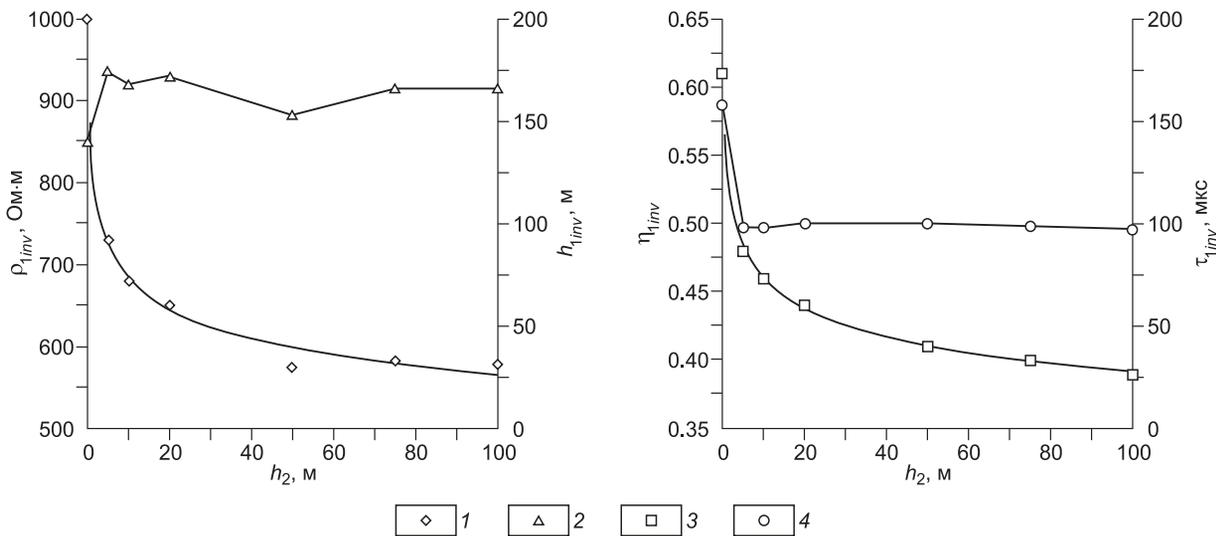


Рис. 6. Графики параметров ρ_{1inv} (1), h_{1inv} (2), η_{1inv} (3), τ_{1inv} (4) верхнего эквивалентного слоя трехслойной модели в зависимости от мощности талика h_2 .

Как показал анализ результатов инверсии, выполненной на основе пятислойной модели (этапы 2, 3), влияние талика на переходную характеристику недостаточно для надежного определения его параметров в качестве отдельного слоя. Однако в результате интерпретации в рамках трехслойной модели (этап 1) выяснилось, что появление талика приводит к закономерному изменению обобщенных или эквивалентных параметров ρ_{1inv} , h_{1inv} , η_{1inv} , τ_{1inv} верхнего слоя (см. рис. 3, в), который на самом деле образован тремя (см. рис. 3, б). Это иллюстрирует рис. 6, где приведены графики найденных в результате инверсии параметров ρ_{1inv} , h_{1inv} , η_{1inv} , τ_{1inv} верхнего, эквивалентного слоя трехслойной модели, в зависимости от мощности талика h_2 . Видно, что появление талика и увеличение его мощности сопровождается закономерным уменьшением параметров ρ_{1inv} и η_{1inv} . Эти изменения могут быть использованы в качестве индикаторов присутствия талика, а также — при наличии априорной информации о строении ВЧР — для оценки его мощности.

Согласно графикам (см. рис. 6), наибольшая чувствительность параметров ρ_{1inv} и η_{1inv} по отношению к изменениям мощности талика наблюдается при изменениях h_2 от нуля до первых десятков метров. При дальнейшем увеличении h_2 крутизна графиков и, соответственно, чувствительность по отношению к изменениям h_2 уменьшаются. Отметим, что в рассматриваемом случае удельное электрическое сопротивление талика довольно высокое (200 Ом·м). Такое значение ρ_2 было выбрано из тех соображений, чтобы оценить возможности ЗСБ в не самых благоприятных условиях. Логично предположить, что при меньших значениях ρ_2 появление талика и/или изменение его мощности должно сопровождаться более значительными изменениями ρ_{1inv} .

При отсутствии талика ($h_2 = 0$) пятислойная модель вырождается в трехслойную (см. рис. 3). В этом случае, как это видно на рис. 6, найденные путем инверсии параметры высокоомного верхнего слоя, в том числе поляризуемость и постоянная времени, практически не отличаются от истинных. Это согласуется с результатами численного эксперимента по оценке возможностей ЗСБ при изучении двухслойных поляризующихся сред [Кожевников, Антонов, 2010], который показал, что если в двухслойной модели поляризующимся является верхний слой, то его параметры определяются с незначительными погрешностями.

Как уже отмечалось, при увеличении мощности талика имеет место закономерное уменьшение поляризуемости η_{1inv} верхнего слоя эквивалентной трехслойной модели. Иная картина наблюдается при рассмотрении постоянной времени τ_{1inv} . В отсутствие талика $\tau_{1inv} = 150$ мкс. Если же в разрезе присутствует талик, τ_{1inv} независимо от его мощности составляет около 100 мкс. В настоящее время затруднительно дать какие-либо комментарии по поводу этого факта кроме очевидного замечания, что при оценке постоянной времени эквивалентность проявилась именно таким образом.

Мощность верхнего слоя h_{1inv} , найденная путем инверсии псевдоэкспериментальных переходных характеристик в рамках трехслойной модели, независимо от толщины талика h_2 отличается от суммарной мощности $h_{1,2,3}$ трех верхних слоев не более чем на 15 %, а в среднем на 10 %. Это проявление так называемой H -эквивалентности: как известно [Матвеев, 1974], при изучении разрезов с проводящим

основанием или слоем, перекрытым высокоомной толщей, индукционные переходные характеристики определяются ее суммарной мощностью и практически не зависят от продольного сопротивления (при условии, что оно намного больше сопротивления проводящего основания или слоя).

Таким образом, согласно результатам численного моделирования, инверсия данных методом ЗСБ с учетом индукционно-вызванной поляризации позволяет определить геоэлектрические параметры верхней части разреза, которые могут быть использованы в качестве индикаторов присутствия или отсутствия в ней талика, а также суммарную мощность ВЧР.

Обсуждавшиеся выше результаты моделирования отражают ситуацию, имевшую место при зондированиях соосной установкой. Поскольку профильные съемки было решено проводить разнесенной установкой, можно было ожидать, что влияние ВПИ окажется ослабленным по сравнению с тем случаем, когда используется соосная установка. Очевидно также, что реальная эффективность нестационарных электромагнитных зондирований при поисках таликов зависит от уровня геологических помех, связанных с пространственной изменчивостью геоэлектрических параметров ВЧР. Однако объем измерений на водораздельном участке был недостаточным для того, чтобы оценить геологические помехи, оказывающие влияние на переходные характеристики в области ранних времен. В целом же выводы о возможностях метода ЗСБ при поисках таликовых зон в условиях интенсивного проявления ВПИ, основанные на численном моделировании, подтвердились в результате интерпретации данных профильных съемок с разнесенной установкой.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СЪЕМОК МЕТОДОМ ЗСБ НА РЕЧНОМ И ОЗЕРНОМ ПРОФИЛЯХ

На рис. 7 показаны типичные переходные характеристики, измеренные разнесенной установкой, а также результаты их инверсии в рамках модели трехслойной среды с поляризующимся верхним слоем. Рис. 7 иллюстрирует разную степень влияния индукционно-вызванной поляризации: от «слабого» (см. рис. 7, а) до значительного (см. рис. 7, б) нарушений монотонности вплоть до двойной смены знака ЭДС (см. рис. 7, в) переходного процесса.

В соответствии с результатами численного эксперимента, которые обсуждались в предыдущем разделе, инверсия переходных характеристик, измеренных на речном и озерном профилях, проводилась преимущественно в рамках трехслойной модели с поляризующимся верхним слоем.

На рис. 8 приведены графики профилирования и разрез сопротивлений по речному маршруту, данные для наглядности в «выпрямленном» изображении. Графики профилирования показывают, как

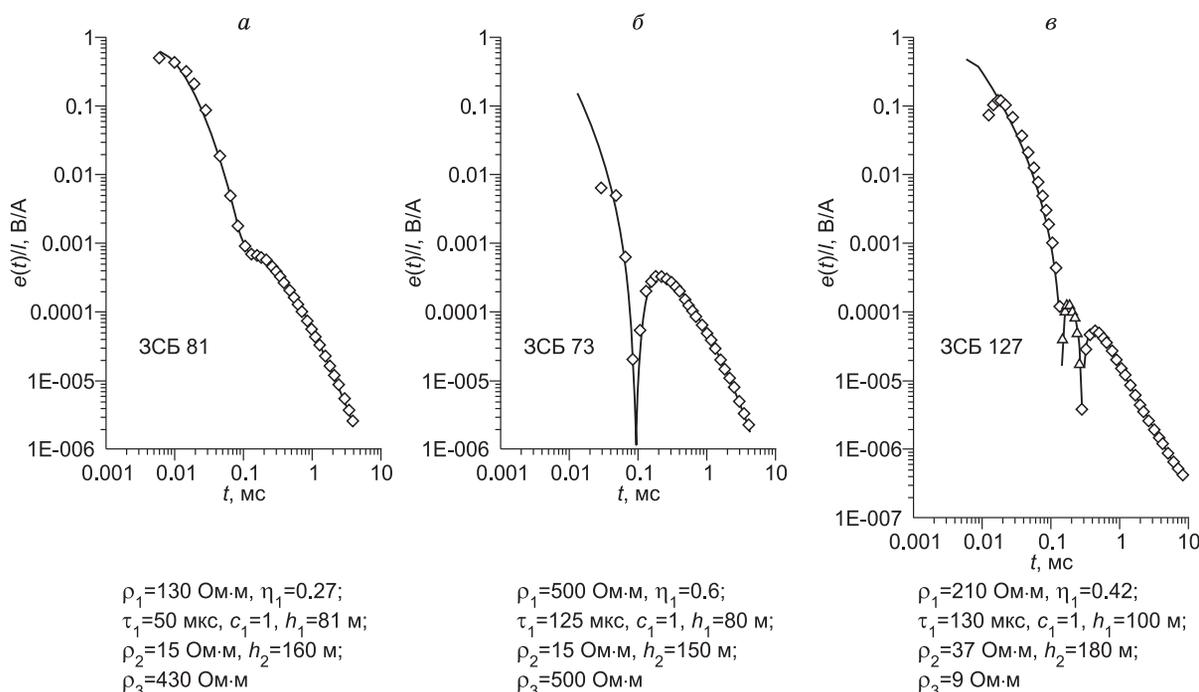


Рис. 7. Переходные характеристики, измеренные разнесенной установкой, результаты их инверсии в рамках модели трехслойной среды с поляризующимся верхним слоем.

а—в — пояснение см. в тексте. Усл. обозн. см. на рис. 2.

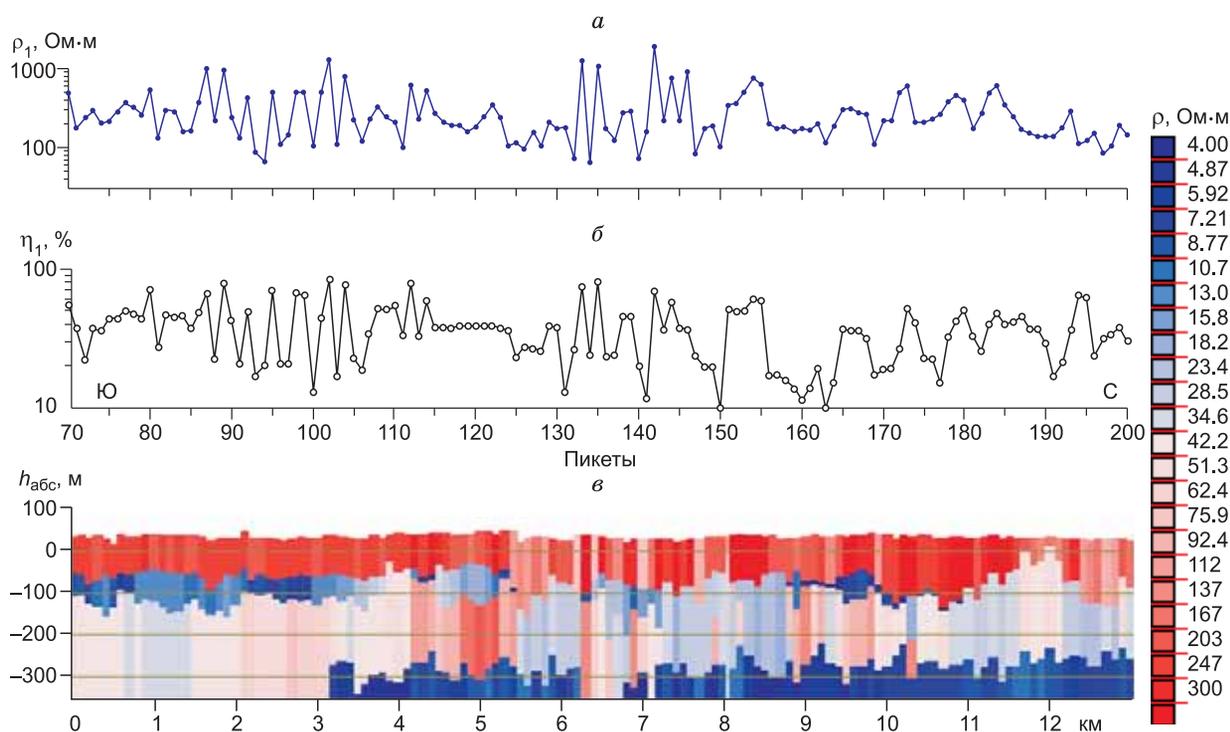


Рис. 8. Графики удельного электрического сопротивления ρ_1 (а), поляризуемости η_1 (б) верхнего слоя и разрез сопротивлений (в) по речному маршруту.

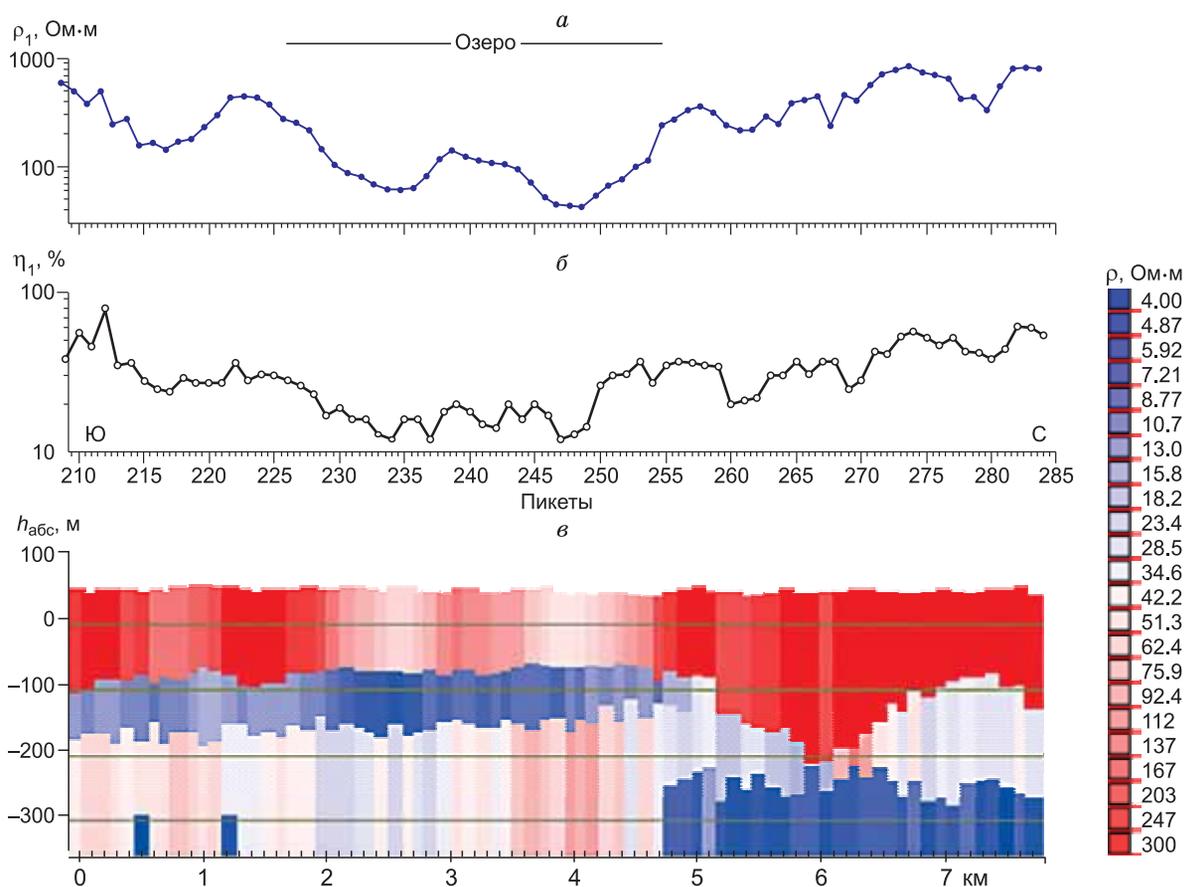


Рис. 9. Графики удельного электрического сопротивления ρ_1 (а), поляризуемости η_1 (б) верхнего слоя и разрез сопротивлений (в) по озерному маршруту.

изменяются удельное сопротивление ρ_1 и поляризуемость η_1 верхнего слоя при перемещении вдоль профиля. Обращает на себя внимание сильная изрезанность графиков; изменения параметров ρ_1 и η_1 вдоль профиля носят случайный характер, что не дает оснований для выделения аномалий сопротивления и поляризуемости, которые можно было бы рассматривать в качестве индикаторов присутствия здесь достаточно протяженных таликов. На разрезе сопротивлений (см. рис. 8, в) видно, что нижняя граница верхнего высокоомного ($\rho_1 > 100$ Ом·м) слоя располагается преимущественно в диапазоне абсолютных высотных отметок от $h_{абс} = -50$ м до $h_{абс} = -100$ м и в целом характеризуется пологим, субгоризонтальным залеганием.

Результаты инверсии данных ЗСБ по озерному маршруту приведены на рис. 9. Графики параметров ρ_1 и η_1 по озерному маршруту — по сравнению с таковыми вдоль речного профиля — характеризуются меньшей «локальной» изменчивостью. В региональном же плане графики со всей очевидностью отражают закономерные изменения параметров по профилю. В пределах интервала протяженностью около 2 км, границы которого совпадают с границами большого озера, отмечаются два пологих смежных минимума (40—200 Ом·м) удельного электрического сопротивления, а также менее контрастная отрицательная аномалия поляризуемости. Это позволило с большой долей вероятности предположить здесь наличие протяженного талика.

Две картировочных и одна разведочная скважина, которые после проведения работ ЗСБ были пробурены в пределах аномалии, вскрыли под озером талик, содержащий водоносные пески. Его размеры в плане примерно совпадают с размерами озера (2.7 км × 1.7 км). Мощность опробованной водоносной толщи достигает 16 м.

На разрезе сопротивлений (см. рис. 9, в) отображаются некоторые особенности геологического строения, которые не видны на графиках профилирования. В частности, обращает на себя внимание значительное увеличение глубины залегания подошвы высокоомного слоя на отрезке профиля между пикетами 260 и 275, а также тот факт, что на северном фланге профиля на глубине около 300 м залегают породы с очень низким (порядка 5 Ом·м) сопротивлением. В настоящее время затруднительно дать однозначную геологическую интерпретацию этим особенностям геоэлектрического разреза. Тем не менее мы сочли необходимым обратить на них внимание в связи с тем, что они свидетельствуют о возможности применения ЗСБ в данном районе не только для поисков таликов, но и в более широком контексте, в частотности, при решении задач объемного геологического картирования.

При изучении поляризующихся сред постоянная времени τ_1 и показатель степени c_1 поляризационного процесса являются важными диагностическими параметрами. Как на речном, так и озерном маршрутах постоянная времени «падает» в диапазон от первых десятков до первых сотен микросекунд при среднем значении около 100 мкс, а показатель степени во всех случаях практически не отличается от единицы. Эти значения типичны для быстро устанавливающейся вызванной поляризации в мерзлых осадочных породах [Kozhevnikov, Antonov, 2012]. Однако графики τ_1 вдоль профилей свидетельствуют о том, что наличие или отсутствие талика не оказывает влияния на постоянную времени поляризационного процесса. Таким образом, параметрами модели Коул-Коул, информативными при поисках таликовых зон, являются удельное электрическое сопротивление и поляризуемость верхней части разреза.

В заключение напомним, что при проведении поисковых работ вдоль речного и озерного маршрутов использовалась установка с одним разносом. Как известно, путем совместной инверсии индукционных переходных характеристик, измеренных двумя установками разного размера, удастся снизить проявления эквивалентности при определении параметров поляризующихся сред [Кожевников, Антонов, 2009]. Поэтому можно ожидать, что использование таких установок, например, с двумя разносами, позволит повысить информативность метода ЗСБ при поисках и оценке таликов.

ВЫВОДЫ

При поисках таликовых зон методом ЗСБ на территории Тазовского района Ямало-Ненецкого автономного округа индукционные переходные характеристики на ранних временах подвержены сильному влиянию индукционно-вызванной поляризации. Это не позволяет оценивать параметры верхней части разреза путем интерпретации данных ЗСБ в рамках модели проводящей неполяризующейся среды.

Инверсия данных ЗСБ на основе модели проводящей поляризующейся среды, удельная электропроводность которой описывается формулой Коул-Коул, снимает указанную проблему.

По данным ЗСБ, геоэлектрическая модель среды в районе исследований является преимущественно трехслойной. Верхний слой мощностью от 100 до 250 м является высокоомным и поляризующимся. Присутствие в нем талика приводит к понижению эффективных сопротивления и поляризуемости слоя, что — как показали результаты работ методом ЗСБ по озерному маршруту и последующего бурения — может быть использовано в качестве поискового признака.

Авторы признательны Е.В. Павлову за замечания, благодаря которым удалось более четко сформулировать некоторые положения статьи.

ЛИТЕРАТУРА

Агеев В.В. Изучение процессов вызванной поляризации для решения геокриологических задач // Разведка и охрана недр, 2012, № 11, с. 46—49.

Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А. «ТЕМ-IP» — система для интерпретации данных индукционных импульсных зондирований поляризующихся сред // Первая Международная научно-практическая конференция по электромагнитным методам исследования «ГЕОБАЙКАЛ-2010», Иркутск, 2010, 2 с.

Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А. Автоматизированная система для интерпретации данных индукционных импульсных электромагнитных зондирований с учетом индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика, 2014, т. 55(8), с. 1282—1283.

Артамонова С.Ю., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Мерзлотно-геологическое строение района мирного подземного ядерного взрыва «Кратон-3» (Якутия) по результатам электромагнитных зондирований // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (5), с. 722—736.

Вопросы поляризации горных пород / Под ред. А.А. Молчанова, В.А. Сидорова. М., 1985, 109 с. Деп. в ВИНТИ, 06.08.85, № 5847-85.

Иванов Ю.К., Бешенцев В.А. Палеогеографические аспекты формирования химического состава пресных подземных вод Ямало-Ненецкого автономного округа // Литосфера Земли, 2005, № 4, с. 188—196.

Захаркин А.К. Компактная приемная петля для импульсной электроразведки // Российский геофизический журнал, 1998, № 9—10, с. 95—99.

Кожевников Н.О. Быстропротекающая индукционно-вызванная поляризация в мерзлых породах // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (4), с. 527—540.

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, 2009, т. 50 (2), с. 181—190.

Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Инверсия индукционных переходных характеристик двухслойных сред с учетом быстро устанавливающейся вызванной поляризации // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (6), с. 905—918.

Кожевников Н.О., Никифоров С.П., Снопков С.В. Исследование быстропротекающих процессов вызванной поляризации в мерзлых породах // Геоэкология, 1995, № 2, с. 118—126.

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 // Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2012. VIII Международный научный конгресс «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых». 10—20 апреля 2012 г., Новосибирск. Т. 1. Новосибирск, СГГА, 2012, с. 168—172.

Корсаков М.А., Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О. Программно-алгоритмическая система для моделирования и совместной интерпретации данных импульсных индукционных зондирований с учетом вызванной поляризации // Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2013. IX Международный научный конгресс «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология». 15—26 апреля 2013 г., Новосибирск. Т. 2. Новосибирск, СГГА, 2013, с. 182—186.

Крылов С.С., Бобров Н.Ю. Применение электромагнитных зондирований для исследования частотной дисперсии электрических свойств мерзлых пород // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 3, с. 59—68.

Матвеев Б.К. Интерпретация электромагнитных зондирований. М., Недра, 1974, 232 с.

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

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

Рабинович Б.И. Основы метода зондирования становлением поля в ближней зоне. Иркутск, ИПИ, 1987, 52 с.

Секачев М.Ю., Балашов Б.П., Саченко Г.В., Захаркин А.К., Вечкапов О.П., Тарло Н.Н., Могилатов В.С., Злобинский А.В. Аппаратурный электроразведочный комплекс «ЦИКЛ-7» // Приборы и системы разведочной геофизики, 2006, № 01(15), с. 44—46.

Стогний В.В. Импульсная индуктивная электроразведка таликов криолитозоны Центральной Якутии. Якутск, ООО «Академия», 2003, 124 с.

Стогний В.В. Импульсная индуктивная электроразведка при изучении поляризующейся среды криолитозоны Якутской кимберлитовой провинции // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 4, с. 46—56.

Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y. Fast-decaying IP in frozen unconsolidated rocks and potentialities for its use in permafrost-related TEM studies // Geophys. Prospecting, 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, v. 66, p. 31—43.

Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. Fast-decaying inductively induced polarization in frozen ground: a synthesis of results and models // J. Appl. Geophys., 2012, v. 82, p. 171—183.

McNeill J.D. Applications of transient electromagnetic techniques. Technical Note N7, Geonics Limited, 1980, 17 p.

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

*Рекомендована к печати 21 апреля 2014 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
22 августа 2013 г.*