

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОИСКАХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

Е.Э. Соловьев^{1*}, И.И. Саввинов¹, А.А. Федоров², М.А. Федоров²

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,

г. Якутск, Российская Федерация

²Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

г. Якутск, Российская Федерация

*solov.evg@yandex.ru

Аннотация. Обеспечение населения качественным питьевым и хозяйственно-бытовым водоснабжением является важной государственной задачей и определяет социально-экономическое благополучие страны. В настоящее время, потребность в дополнительных водных ресурсах испытывают населенные пункты Центральной Якутии. Поэтому актуальным становится поиск и использование подземных источников для бесперебойного снабжения населенных пунктов водой.

В настоящей статье рассмотрены результаты геофизических исследований методом переходных процессов при поисках подземных вод в Центральной Якутии в условиях криолитозоны. Обосновано применение индуктивной импульсной электроразведки в условиях криолитозоны. Объектом изучения являлся локально-водоносный криогенно-таликовый четвертичный-верхнеюрский терригенный водоносный комплекс (Q-J3), распространенный под руслами р. Лена и её наиболее крупных притоков в пределах подрусловых таликов. Геофизические исследования проведены в пределах группы озер Маччия, расположенных на территории Мегино-Кангаласского района Республики Саха (Якутия).

Зондирование методом переходных процессов выполнено в профильном режиме в соосном варианте «Q-q». По результатам электроразведочных работ построены геоэлектрические разрезы. Установлено, что разрез изучаемой площади имеет однотипное геоэлектрическое строение. Разрезы имеют выраженный горизонтально-слоистый характер и состоят из чередования электрических аномальных слоев с различными значениями кажущейся продольной проводимости. По результатам обработки и интерпретации электроразведочных работ проведено бурение заверочной скважины НБТ-1 для получения более подробной информации о геологическом строении исследуемой территории. Сопоставление данных бурения и электроразведки показало высокую сходимость. Анализ геофизических данных показал, что водонасыщенные горизонты в пределах изучаемой площади выделяются пониженными значениями кажущейся продольной проводимости.

Ключевые слова: Электроразведка, зондирование методом переходных процессов, геоэлектрические разрезы, аномалии, подземные воды, водоносные горизонты

Для цитирования: Соловьев Е.Э., Саввинов И.И., Федоров А.А., Федоров М.А. Применение метода переходных процессов при поисках подземных вод в Центральной Якутии. *Вестник СВФУ*. 2026;(2): 33-43. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-33-43

APPLICATION OF THE TRANSIENT ELECTROMAGNETIC FIELD SOUNDING IN THE PROSPECTING OF GROUNDWATER IN CENTRAL YAKUTIA

Evgeny E. Solovyov^{1}, Innokenty I. Savvinov¹, Aleksey A. Fedorov², Mikhail A. Fedorov²*

¹M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,

Yakutsk, Russian Federation

²P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS,

Yakutsk, Russian Federation

*solov.evg@yandex.ru

Abstract. Providing the population with high-quality drinking and household water supply is an important state task and determines the socio-economic well-being of the country. Currently, the need for additional water resources is being experienced by the settlements of Central Yakutia. Therefore, it is becoming urgent to search for and use underground sources for uninterrupted supply of water to settlements.

This article discusses the results of geophysical studies using the transient electromagnetic field sounding in the search for groundwater in Central Yakutia in the cryolithozone. The reasons for the use of inductive pulse electrical exploration in cryolithozone conditions are given. The object of study was the locally aquiferous cryogenic-talic Quaternary-Upper Jurassic terrigenous aquifer complex (Q-J3), distributed under the beds of the Lena River and its largest tributaries within the subsurface talics. The geophysical studies were carried out within the Machchia group of lakes located on the territory of the Megino-Kangalassky district of the Sakha Republic (Yakutia).

The transient electromagnetic field sounding is performed in profile mode in the coaxial “Q-q” version. Geoelectric sections were constructed based on the results of electrical exploration. It was established that the section of the studied area has the same type of geoelectric structure. The sections have a pronounced horizontally layered character and consist of alternating electrical anomalous layers with different values of apparent longitudinal conductivity. Based on the results of the processing and interpretation of the electrical exploration work, the NBT-1 test well was drilled to obtain more detailed information about the geological structure of the studied area. A comparison of drilling and electrical exploration data showed high convergence. An analysis of the geophysical data showed that the water-saturated horizons within the studied area are distinguished by reduced values of apparent longitudinal conductivity.

Keywords: Electrical prospecting, transient electromagnetic field sounding, geoelectric sections, anomalies, groundwater, aquifers

For citation: Solovyov E.E., Savvinov I.I., Fedorov A.A., Fedorov A.M. Application of the method of transient processes in the prospecting of groundwater in Central Yakutia. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2026;(2): 33-43. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-33-43

Введение

Обеспечение населения качественным питьевым и хозяйственно-бытовым водоснабжением является важной государственной задачей и определяет социально-экономическое благополучие страны. В настоящее время, потребность в дополнительных водных ресурсах испытывают населенные пункты Центральной Якутии, где невозможно организовать надежное водоснабжение за счет поверхностных вод из-за сезонности стока малых рек и высокой подверженности загрязнению водотоков и водоемов. Поэтому актуальным становится поиск и использование подземных источников для бесперебойного обеспечения населенных пунктов водой.

Поиски водоносных горизонтов, опирающиеся на исключительно геологическое картирование и поисковое бурение сопряжены с высокой стоимостью и локальностью полученных данных. Для получения детальной и непрерывной информации о гидрогеологической обстановке исследуемых площадей широко применяются геофизические методы разведки, преимущество которых заключается в оперативности, экологической безопасности и минимальных затратах.

Ведущая роль при поисках и локализации водовмещающих структур в различных геолого-гидрогеологических условиях отводится электроразведке методами сопротивлений, характеризующихся высокой чувствительностью к изменению водонасыщенности, пористости, трещиноватости и минерализации [1]. К недостаткам традиционных контактных методов электроразведки на постоянном токе относятся низкая эффективность из-за экранирующего влияния непроводящих мерзлых пород, влияния сезонной геоэлектрической изменчивости состояния деятельного слоя, большие трудозатраты на осуществление гальванического контакта электродов на сухих или мерзлых приповерхностных отложениях, а также недостаточной глубинности и детальности исследований [2].

В связи с этим, при поисках подземных вод внимание привлекает зондирование методом переходных процессов [3, 4]. Достоинства метода заключаются в отсутствии необходимости заземления, высокой чувствительности по отношению к проводникам, перекрытых слабопроводящими экранами и значительной глубине зондирования [5, 6].

В настоящей статье представлены результаты электроразведочных исследований при поисках подземных вод для решения проблем водоснабжения п. Нижний Бестях Мегино-Кангаласского района Республики Саха (Якутия).

Объект исследований

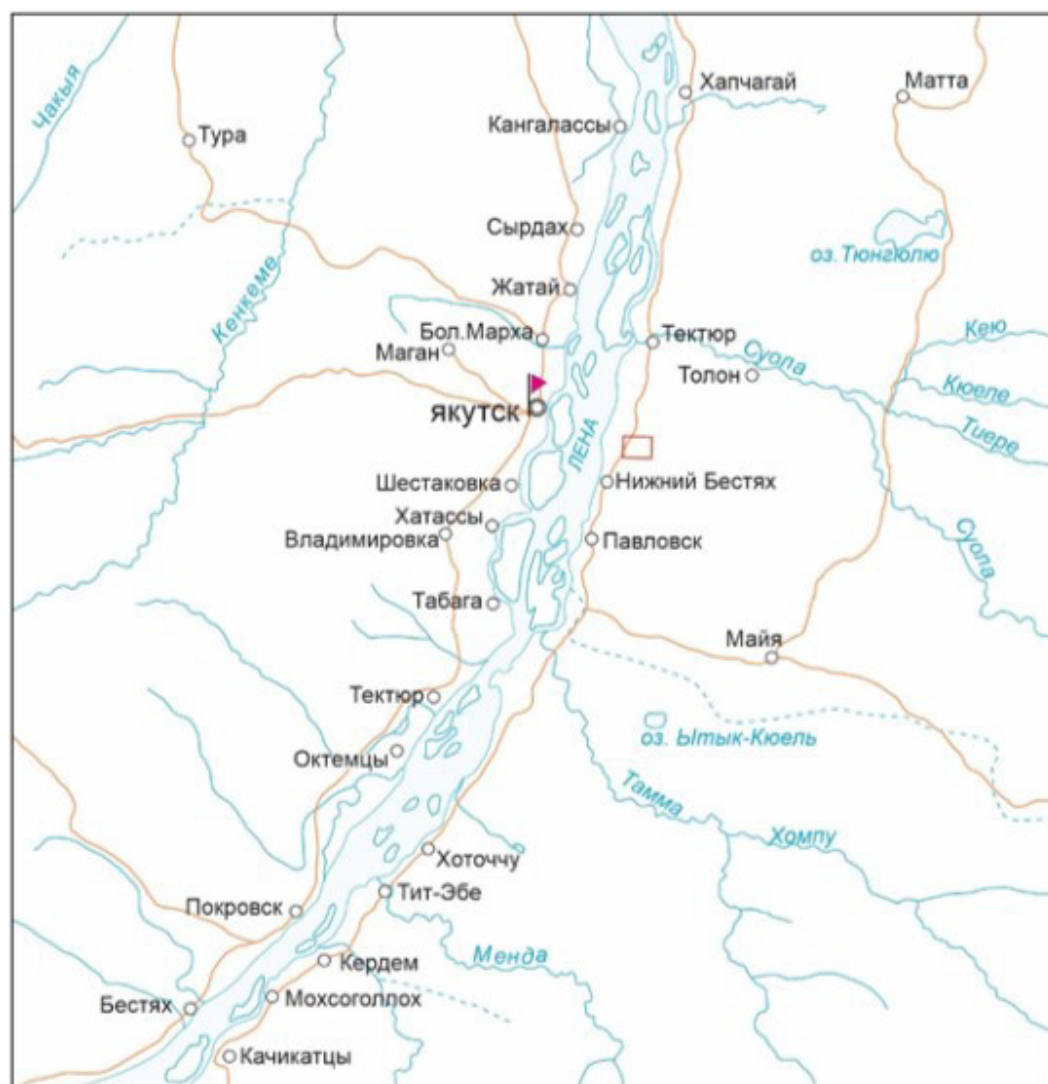
Исследуемая территория расположена на правом берегу в пределах Мегино-Кангаласского района (рис. 1). В орографическом отношении площадь работ расположена в пределах Центрально-Якутской низменности. Рельеф территории района представлен эрозионно-аккумулятивным типом, который сформировался в результате аккумулятивной деятельности постоянного водного потока – р. Лены. Климат резко континентальный. Продолжительная холодная зима и низкие среднегодовые температуры воздуха обуславливают глубокое промерзание осадочных толщ и наличие многолетнемерзлых пород.

Объектом изучения является локально-водоносный криогенно-таликовый четвертичный-верхнеюрский терригенный водоносный комплекс ($Q-J_3$), распространенный под руслами р. Лена и её наиболее крупных притоков в пределах подрусловых таликов, а также под озерными и аласными котловинами по обоим берегам р. Лены. Водовмещающими породами являются отложения четвертичного и юрского возраста, составляющие единые комплексы, объединенные общностью условий формирования и питания таликовых вод. Питание таликовых водоносных комплексов осуществляется за счет инфильтрации речных и озерных вод. Этим объясняется высокое положение статических уровней подземных вод, привязанных к уровням рек и озер, а также их сезонные колебания.

Методика исследований

Зондирование методом переходных процессов (ЗМП) применяется для поисков проводящих объектов. Сущность метода основана на изучении переходного процесса после пропускания через генераторную петлю П-образных импульсов длительностью в несколько миллисекунд. После подачи импульса тока в незаземленную петлю, включается приемная петля, где с помощью измерительного прибора исследуют характер изменения переходного процесса в интервале от 0 до 0,1 с. При наличии проводящего объекта в зоне действия питающего устройства, после выключения тока в нем индуцируются вихревые токи, которые в первоначальный момент возникают на его поверхности и далее распространяются к его центру, постепенно затухая. Затухание происходит за счет тепловых потерь, которые увеличиваются с ростом удельного сопротивления объекта. Этот процесс носит название становление поля в земле, а зависимость напряжения в измерительной петле от времени, прошедшего с момента переключения тока в питающей петле – кривой становления поля.

Таким образом, чем больше его проводимость, тем медленнее в нем происходит затухание вторичных вихревых токов [7, 8]. Переменное магнитное поле вторичных токов индуцирует в приемной петле электродвижущую силу (ЭДС). Причем ЭДС в приемной петле пропорционально скорости изменения магнитного потока.



Условные обозначения

- | | |
|-----------------|-------------------|
| ○ Нижний Бестях | населенные пункты |
| | реки и ручьи |
| | автодороги |
| | территория работ |

Рис. 1. Обзорная карта района проведения исследований

Fig. 1. Overview map of the research area

Зондирование методом переходных процессов выполнено в профильном режиме в соосном варианте «Q-q» (геометрические центры приемной и генераторной петель совпадают). При выполнении исследований применялись генераторные петли с разными геометрическими моментами. Для изучения приповерхностной части разреза до глубины 20 м использовалась петля с малой размерностью 7,5 x 7,5 м. Исследования более глубоких горизонтов до 100 м проведены с генераторной петлей с геометрическим моментом 25x25 м. Применяемая аппаратура – телеметрическая станция Импульс-Десант [9].

Работы проведены при следующих параметрах: период импульса подаваемого тока – 10 мс, сила тока – 10 А, момент приемной петли – 20 м², размеры генераторной петли составляли 56 и 625 м². Для исключения случайных ошибок, количество накоплений сигналов на одной точке зондирования составляло 32 измерения. Синхронизация между генератором и измерителем проводилась через GPS-приемники.

Камеральная обработка и интерпретация полевых материалов проводилась с помощью компьютерной программы «АВС» (разработчик ООО «СибГеоТех») и включала следующие итерации:

- визуализацию геофизических измерений;
- экспресс-анализ данных с отбраковкой и фильтрацией кривых ЭДС;
- вычисление координат точек наблюдений;
- построение схемы отработки участка;
- построение геоэлектрических разрезов S_t ;
- сопоставление геоэлектрических разрезов с данными бурения.

Основу параметрической интерпретации и решения обратной задачи составляет трансформация поля в функции кажущейся продольной проводимости S (S_t) и глубины ее залегания (H_t), предложенная В.А. Сидоровым, В.В. Тикшаевым [4, 10].

$$\text{Плоскость } S$$

$$S_\tau = \frac{2}{\mu_0} \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot Mg \cdot Mi \cdot \mu_0} \right)^{1/3} \cdot \left[\frac{t_{i+1} - t_i}{\frac{1}{(E_{i+1})^{1/2}} - \frac{1}{(E_i)^{1/4}}} \right]^{4/3}, \quad (1)$$

$$h_\tau = \left[\frac{3 \cdot Mg \cdot Mi}{16 \cdot \pi \cdot S \cdot \varepsilon_i} \right]^{1/4} - \frac{t_i}{\mu_0 \cdot S}, \quad (2)$$

$$H_s = k \cdot \left(h_\tau + \frac{t}{\mu_0 \cdot S} \right), \quad (3)$$

$$H_m = k \cdot \sqrt{\rho_\tau \cdot t}, \quad (4)$$

где $Mg = Sg \cdot n_g (\text{м}^2)$ – момент генератора, $Mi = Si \cdot n_i (\text{м}^2)$ – момент измерителя, t – время (с), $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $\pi = 3.1415...$, E – ЭДС (В), k – некоторый коэффициент, определяемый экспериментально, h_τ – кажущаяся глубина (м), H_s – текущая глубина зондирования (м), H_m – текущая глубина для полупространства (м).

Результаты и обсуждение

Геофизические исследования методом ЗМПП выполнены в пределах группы озер Маччия на 9 профилях по сети наблюдений 100 x 25 м (рис. 2). По результатам электроразведочных работ построены геоэлектрические разрезы. Анализ геофизических материалов показал, что

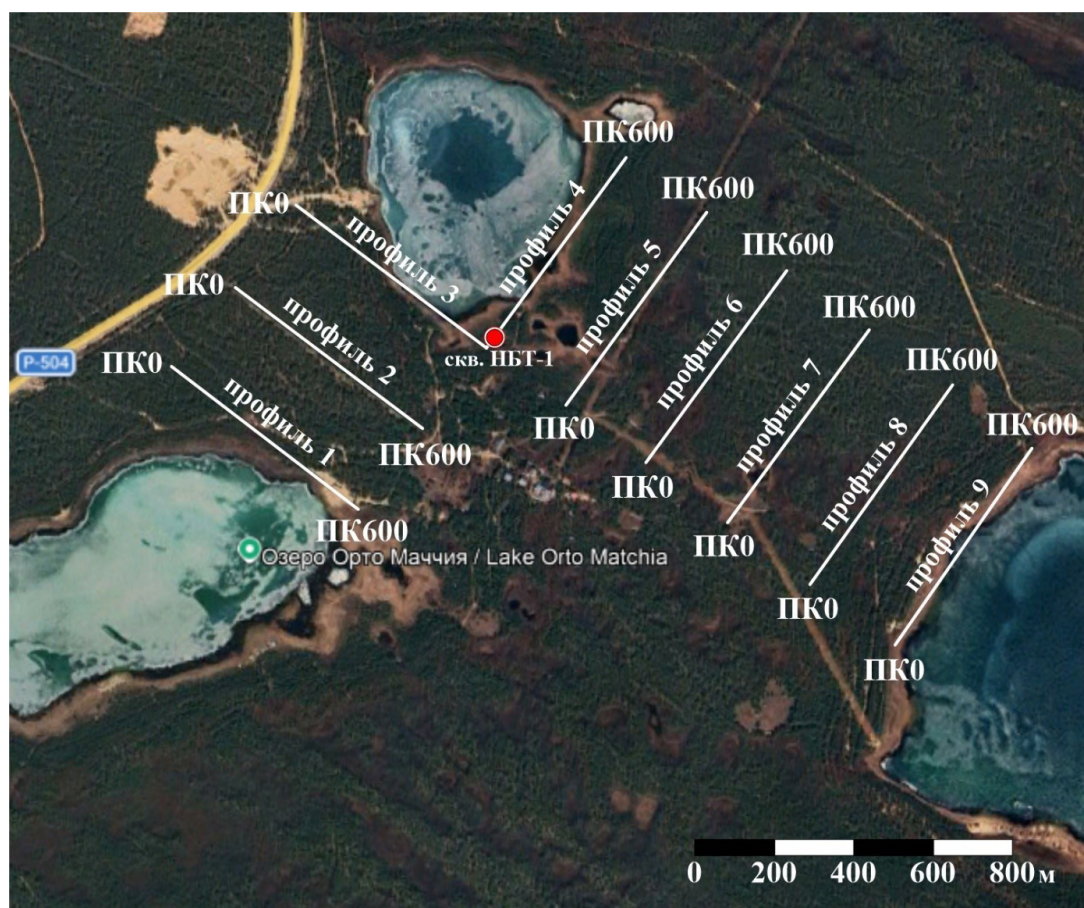


Рис. 2. Схема геофизических профилей (карты Google Earth)

Fig. 2. The scheme of geophysical profiles (Google Earth maps)

приповерхностная часть разреза изучаемой площади имеет однотипное геоэлектрическое строение (рис. 3). Разрезы имеют выраженный горизонтально-слоистый характер и состоят из чередования электрических аномальных слоев с различными значениями кажущейся продольной проводимости.

Слои с пониженными значениями продольной проводимости 0,72-0,8 мСм/м фиксируются в интервалах глубин 7,8-10 м и от 15 до 17 м и ниже. Слой повышенных значений продольной проводимости интенсивностью 1-1,12 отмечается, в основном, в интервалах глубин 10,5 – 14,8 м.

Геоэлектрические разрезы в интервале глубин 20 – 100 м в пределах изученной площади характеризуются двухслойным строением (рис. 4). В верхней части разрезов повсеместно фиксируется геоэлектрический слой с пониженными значениями кажущейся продольной проводимости интенсивностью 0,25-0,35 мСм/м. Глубина залегания нижней границы данного геоэлектрического слоя изменяется, в основном, от 56 до 73 м. Исключение составляет профиль 7, где подошва описываемого геоэлектрического слоя фиксируется на глубине 93 м.

Нижний слой представлен геоэлектрическими аномалиями пониженных значений кажущейся продольной проводимости, значения которых варьируют от 1,3 до 6,8 мСм/м.

По результатам обработки и интерпретации электроразведочных работ выбрано место заложения заверочной скважины НБТ-1 на профиле 4 пикете 25 для получения более подробной информации о геологическом строении исследуемой территории. Сопоставление геоэлектрических разрезов по данным ЗМПП с данными бурения представлены на рисунках 5 и 6.

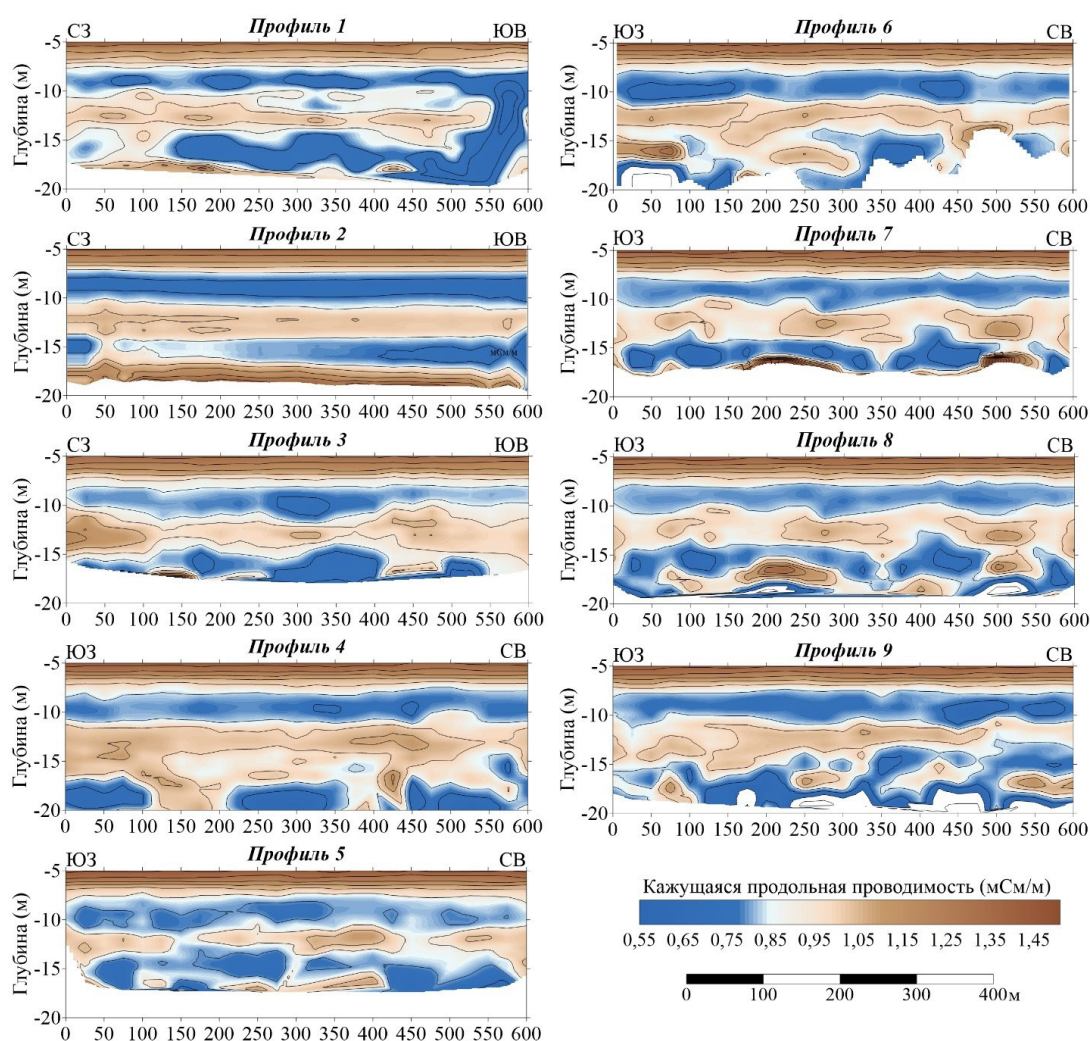


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы кажущейся продольной проводимости S_e (при $Q = 7,5 \times 7,5$ м)

Fig. 3. Geoelectric sections of apparent longitudinal conductivity (at $Q = 7.5 \times 7.5$ m)

Полученные электрометрические характеристики приповерхностной части разреза коррелируются с материалами пробуренной скважины НБТ-1 (рис. 5). Верхняя часть разреза, представленная крупнозернистыми, водонасыщенными песками до глубины 16 м отмечается значениями кажущейся продольной проводимости 0,82-1,26 мСм/м. Нижележащий слой, сложенный крупнозернистыми полевошпатово-кварцевыми песками не содержащих воду, фиксируется низкими значениями продольной проводимости 0,75-0,86 мСм/м.

Результаты зондирования более глубоких горизонтов до 100 м также показали хорошую схожимость с данными бурения по скважине НБТ-1 (рис. 6). Верхняя часть разреза, представленная водонасыщенными четвертичными отложениями, отмечается пониженными значениями продольной проводимости 0,32-0,42 мСм/м.

В нижнем интервале глубин 71-100 м разрез представлен верхнеюрским комплексом, состоящим из алевролитов и песчаников, которые характеризуются повышенными значениями кажущейся продольной проводимости 0,9-1,69 мСм/м.

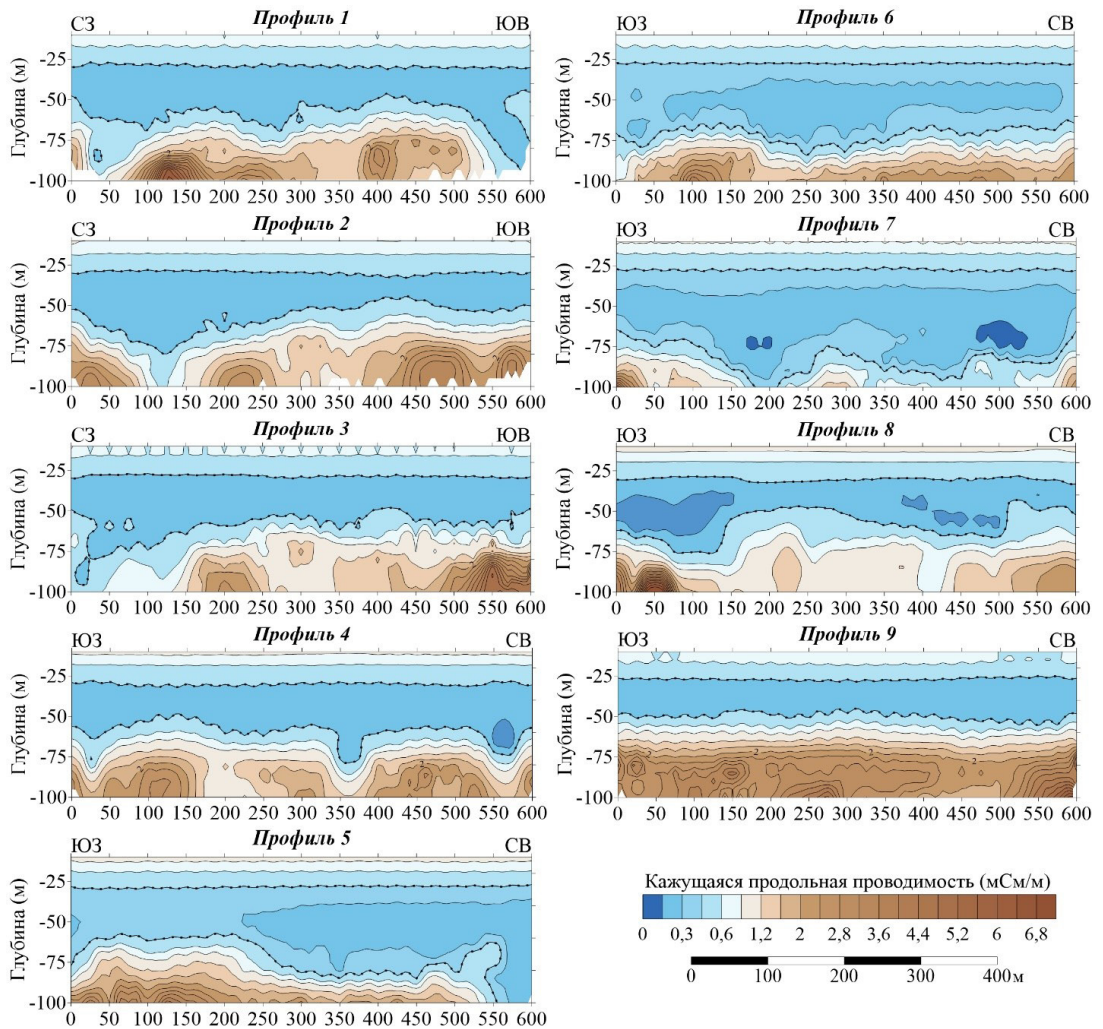


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы кажущейся продольной проводимости S_r (при $Q=25 \times 25$ м)

Fig. 4. Geoelectric sections of apparent longitudinal conductivity (at $Q=25 \times 25$ m)

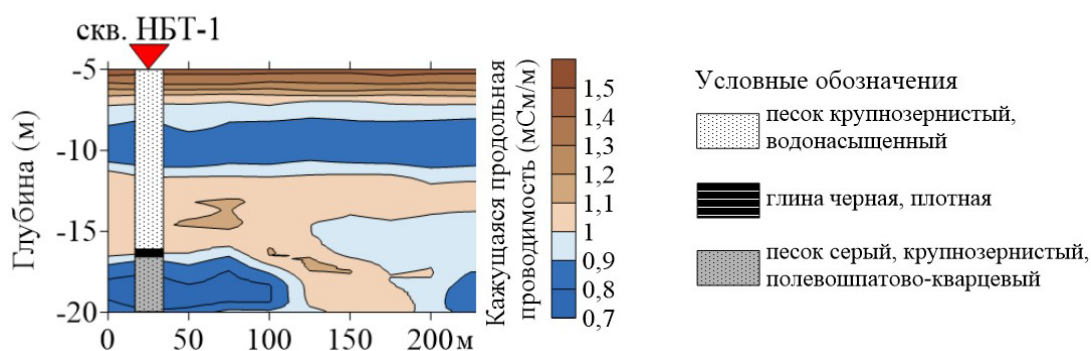


Рис. 5. Сопоставление геоэлектрических разрезов с данными бурения (скважина НБТ-1) по профилю 4

Fig. 5. Comparison of geoelectric sections with drilling data (NBT-1 well) according to profile 4

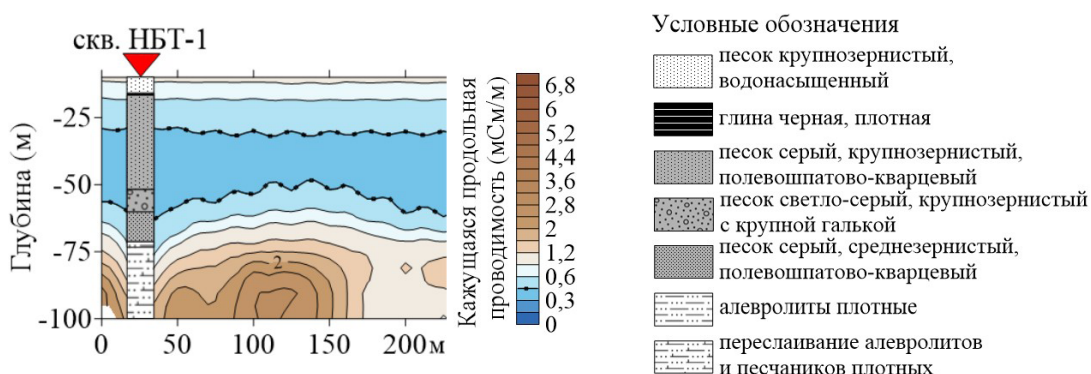


Рис. 6. Сопоставление данных МПП с геологическими данными по профилю 4 (при $Q=25 \times 25$ м)

Fig. 6. Comparison of MPP data with geological data on profile 4 (at $Q=25 \times 25$ m)

Заключение

Проведенные геофизические исследования в пределах группы озер Мачтия подтвердили высокую эффективность метода ЗМПП при поисках подземных вод в Центральной Якутии в условиях криолитозоны.

Приповерхностная часть разреза до глубины 20 м характеризуется горизонтально-слоистым строением и состоит из чередования электрических аномальных слоев с различными значениями кажущейся продольной проводимости. Геоэлектрические разрезы в интервале глубин 20 – 100 м в пределах изученной площади имеют двухслойное строение. До глубины 71 м повсеместно фиксируется геоэлектрический слой с пониженными значениями кажущейся продольной проводимости интенсивностью 0,32-0,42 мСм/м. Ниже залегающие породы верхнеюрского комплекса выделяются повышенными значениями кажущейся продольной проводимости 0,9-1,69 мСм/м.

По результатам обработки и интерпретации материалов ЗМПП определено место заложения заверочной скважины НБТ-1. Сопоставление данных бурения и электроразведки показало высокую сходимость. В ходе комплексного анализа геолого-геофизических материалов установлено, что водонасыщенные горизонты в пределах изучаемой площади выделяются низкими значениями проводимости.

Литература

1. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. М.: Недра; 1990. 436 с.
2. Ним Ю.А. Зондирования методом переходных процессов при исследовании криолитозоны: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Иркутск. 1991. 39 с.
3. Ним Ю.А., Федоров А.М. Зондирование методом переходных процессов при поисках и картографировании криопэггов. В кн.: Мерзлотно-гидрогеологические исследования зоны свободного водообмена. Москва; 1989:112-125.
4. Ним Ю.А., Омеляненко А.В., Стогний В.В. Импульсная электроразведка криолитозоны. Новосибирск: СО РАН НИЦ ОИГТМ; 1994. 188 с.
5. Матвеев Б.К. Интерпретация электромагнитных зондирований. М.: Недра; 1974. 232 с.
6. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю., Захаркин А.К., Корсаков М.А. Поиск таликов методом ЗСБ в условиях интенсивного проявления индукционно-вызванной поляризации. *Геология и геофизика*. 2014;55(12):1815-1827.
7. Булгаков Ю.И., Вакульский А.А., Велиник А.Б., и др. Руководство по применению метода переходных процессов в рудной геофизике. Л.: Недра; 1976. 128 с.
8. Соловьев Е.Э., Фридовский В.Ю., Адаров Т.Д., и др. Электромагнитные исследования гидротехнических сооружений в условиях криолитозоны. *Горный журнал*. 2012;(12):21-26.
9. Тригубович Г.М. Инновационные поисково-оценочные технологии электроразведки становлением поля воздушного и наземного базирования. *Разведка и охрана недр*. 2007;(8):80-87.
10. Сидоров В.А., Тикшаев В.В. Электроразведка зондированиями становлением поля в ближней зоне. Саратов: Изд-во Нижневолжского НИИГиГ; 1969. 68 с.

References

1. Ogilvy A.A. *Fundamentals of engineering geophysics*. Moscow: Nedra; 1990:436 (in Russian).
2. Nim Yu.A. *Probing by the transient process method in the study of permafrost*: Summary of Doctoral dissertation (Geology and Mineralogy). Irkutsk. 1991:39 (in Russian).
3. Nim Yu.A., Fedorov A.M. Probing by the transient process method in the search and mapping of cryopegs. In: *Permafrost and hydrogeological studies of the zone of free water exchange*. Moscow; 1989:112–125 (in Russian).
4. Nim Yu.A., Omelianenko A.V., Stogniy V.V. *Pulsed electrical exploration of the cryolithozone*. Novosibirsk: SB RAS Research Center OIGGM; 1994:188 (in Russian).
5. Matveev B.K. *Interpretation of electromagnetic soundings*. Moscow: Nedra; 1974:232 (in Russian).
6. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu., Zakharkin A.K., Korsakov M.A. Search for taliks by the ZSB method in conditions of intense manifestation of induction-induced polarization. *Geology and Geophysics*. 2014;55(12):1815–1827 (in Russian).
7. Bulgakov Yu.I., Vakulsky A.A., Velinik A.B., et al. *Guidelines for the application of the transient process method in ore geophysics*. Leningrad: Nedra; 1976:128 (in Russian).
8. Soloviev E.E., Fridovsky V.Yu., Adarov T.D., et al. Electromagnetic studies of hydraulic structures in permafrost conditions. *Mining Journal*. 2012;(12):21–26 (in Russian).
9. Trigubovich G.M. Innovative exploration and evaluation technologies of electrical prospecting by the field formation of air and ground basing. *Exploration and Protection of Mineral Resources*. 2007;(8):80–87 (in Russian).
10. Sidorov V.A., Tikshaev V.V. *Electrical prospecting by field formation in the near zone*. Saratov: Publishing House of the Nizhnevolzhsky Research Institute of Geology and Geophysics; 1969:68 (in Russian).

Сведения об авторах

СОЛОВЬЕВ Евгений Эдуардович – кандидат геолого-минералогических наук, проректор по научной и инновационной деятельности СВФУ, ORCID 0000-0002-3596-2272; Scopus ID: 57208142215; SPIN-код: 7748-1230, AuthorID: 144694

САВВИНОВ Иннокентий Иннокентьевич – старший преподаватель ГРФ СВФУ, SPIN-код: 1021-9050, AuthorID: 1072638

ФЕДОРОВ Алексей Альбертович – научный сотрудник лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН, ORCID 0009-0001-2238-0548; Scopus ID: 60025099500;

ФЕДОРОВ Михаил Альбертович – научный сотрудник лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН, ORCID 0009-0005-6075-4634; Scopus ID: 60025264600; eLIBRARY ID: 73346421

About the authors

Evgeny E. SOLOVYOV – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Vice-Rector for Research and Innovation, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, ORCID 0000-0002-3596-2272; Scopus ID: 57208142215; SPIN code: 7748-1230, AuthorID: 144694

Innokenty I. SAVVINOV – Senior lecturer, Faculty of Geology and Survey, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, SPIN code: 1021-9050, AuthorID: 1072638

Aleksey A. FEDOROV – Researcher at the Laboratory of Groundwater and Geochemistry of Cryolithozones, Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, ORCID 0009-0001-2238-0548; Scopus ID: 60025099500

Mikhail A. FEDOROV – Researcher, Laboratory of Groundwater and Geochemistry of Cryolithozones, Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, ORCID 0009-0005-6075-4634; Scopus ID: 60025264600; eLibrary ID: 73346421

Вклад авторов

Соловьев Е.Э. – разработка концепции, проведение исследования, редактирование рукописи.

Саввинов И.И. – проведение статистического анализа, визуализация/представление данных.

Федоров А.А. – проведение исследования, редактирование рукописи.

Федоров М.А. – проведение исследования, редактирование рукописи.

Authors' contribution

Evgeny E. Solovyov – concept development, research, manuscript editing.

Innokenty I. Savvinov – conducting statistical analysis, visualization/presentation of data.

Aleksey A. Fedorov – research, manuscript editing.

Mikhail A. Fedorov – research, manuscript editing.

Конфликт интересов

Один из авторов – Соловьев Евгений Эдуардович является членом редакционного совета журнала «Вестник СВФУ им. М.К. Аммосова». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

Conflict of interests

One of the authors, Evgeny Solovyov, is a member of the editorial board of the journal “Vestnik of North-Eastern Federal University”. The authors are unaware of any other potential conflict of interest related to this manuscript.

Поступила в редакцию / Submitted 18.05.2026

Поступила после рецензирования / Revised 10.06.2026

Принята к публикации / Accepted 22.06.2026