

Е. В. Агеев¹, В. В. Потапов^{1✉}, В. В. Оленченко¹, Е. Ю. Антонов¹

Результаты исследования многолетнемерзлой толщи методом ЗСБ в окрестностях р. Пур

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения
Российской академии наук,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: potapovvv@ipgg.sbras.ru

Аннотация. С водоёмами Западной-Сибири связано возникновение таликовой зоны в криогенной толще. Талики гидрогенного класса формируются за счёт тепла, аккумулированного поверхностными или подземными водами. Обычно сквозные водопроводящие (подрусловые) талики приурочены к руслам крупных рек и их наиболее крупных притоков. Применение электроразведочного метода становления поля в ближней зоне (ЗСБ) широко распространено для изучения криогенной толщи. Целью данных работ было на основе геофизических данных определить влияние речной долины на криогенную толщу. По результатам измерений методом ЗСБ вдоль профиля пересекающего долину р. Пур построен предварительный интерпретационный разрез, на котором показано криогенное состояние геологических образований.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, подрусловой талик, электромагнитные зондирования, геоэлектрический разрез, индукционно-вызванная поляризация

E. V. Ageenkov¹, V. V. Potapov^{1✉}, V. V. Olenchenko¹, E. Y. Antonov¹

The results of the study of permafrost strata by the TEM method in the vicinity of the Pur river

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

Abstract. The occurrence of the talik zone in the cryogenic stratum is associated with the reservoirs of Western Siberia. Hydrogenic class taliks are formed due to heat accumulated by surface or groundwater. Usually, through-running (subsurface) taliks are confined to the beds of large rivers and their largest tributaries. The use of electrical exploration was near-field transient electromagnetic sounding (TEM) is widely used to study cryogenic stratum. The purpose of these studies was to determine the influence of the river valley on the cryogenic stratum based on geophysical data. Based on the results of measurements by the TEM method, a preliminary interpretative section was constructed along the profile crossing the valley of the Pur River, which shows the cryogenic state of geological formations.

Keywords: permafrost, river talik, electromagnetic soundings, geoelectrical section, induction-induced polarization

Введение

На строение многолетнемерзлых пород (ММП) оказывают влияние локальные или аazonальные факторы, такие как нефтегазовые структуры и подрусловые талики.

С последним обстоятельством связана необходимость детализации и подробного изучения строения ММП в современных границах пойм крупных рек.

Крупные водотоки и водоёмы в регионах развития многолетнемёрзлых пород выступают в роли мощных тепловых агентов, способствуя формированию обширных гидрогенных таликовых зон [11, 12, 15], которые значительно усложняют внутреннее строение криогенной толщи [5].

Обычно на геологических разрезах границы талых и мёрзлых пород изображают в основном по наитию, из общих соображений об отепляющем действии воды, или на основании бурения ограниченного количества скважин.

Электроразведочные методы для изучения ММП стали применяться давно. Электроразведочные методы, позволяют уточнять границы таликов. Первоначально использовались измерения на постоянном токе, а позднее на переменном.

Известные работы включают исследование таликовых зон методом ЗСБ на севере Западной Сибири [1, 7], а также комплексирование электромагнитных зондирований с тепловым моделированием для уточнения геометрии подозёрного талика на Аляске [16].

Целью наших исследований было установление структуры ММП, в частности подруслового талика, в границах поймы р. Пур.

Методы и материалы

Геофизический профиль пересекал р. Пур в 3 км к северу от п. Уренгой (рис. 1). Ширина русла в этом месте составляет 1100 м.

Район работ относится к зоне прерывистого распространения современных ММП до глубины 25–80 м с наличием реликтовой многолетнемёрзлой толщи в интервале глубин 150–400 м [9].

При измерениях многолетнемерзлых пород методом ЗСБ помимо процессов становления поля также генерируются и регистрируются процессы вызванной поляризации. Под эффектом вызванной поляризации (ВП) обычно понимают совокупность электрохимических и электрокинетических процессов, происходящих в горных породах под действием электрического тока и сопровождаемых возникновением вторичных ЭДС [8]. Механизм проявления ВП, в этом случае, связан с электрохимической поляризацией пленок незамерзшей воды, которая при температурах ниже 0°C в связанном состоянии остается на поверхности минеральных зерен.

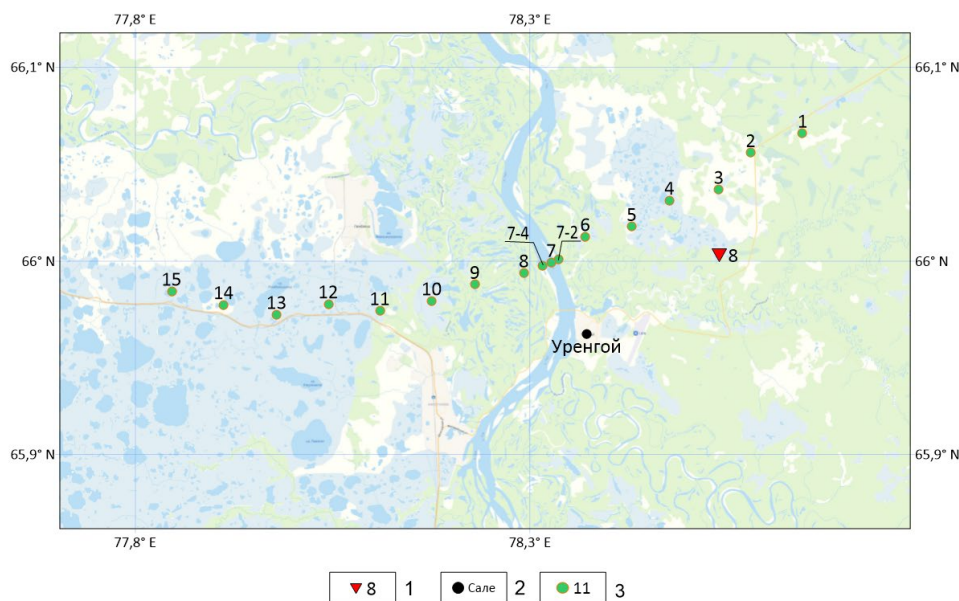


Рис. 1. Схема расположения профиля через р. Пур:

- 1 – номер площадки ЗСБ субмеридионального профиля 2023 г. [2];
2 – населённый пункт; 3 – площадки измерений методом ЗСБ с номерами.

В результате измеряемый сигнал содержит в себе суммарный сигнал от этих двух процессов. Из теории методов ЗСБ и ВП [13] известно, что в случае, когда измерительная петля соосна генераторной, то процессы ВП имеют максимальный вклад в сигнал. В случае же если измерительная петля разнесена от центра генераторной, тогда влияние процессов ВП ослабляется. Таким образом для определения параметров ВП при измерениях сигнала становления, необходимо измерение как соосных, так и разнесенных петель.

Схема измерений (рис. 2) включала два генераторных контура и четыре приёмных петли. Сигнал ЗСБ от каждого генераторного контура размером 100×100 м регистрировался с помощью одновитковых приёмных петель (20×20 м), установленных на двух пикетах. Один пикет был соосным, а второй – выносным (разнос 100 метров), расположенным в центре соседнего генераторного контура.

В ходе исследований были выполнены измерения на 17 площадках с близким к равномерному расположением вдоль профиля (среднее расстояние между площадками составило около 2.5 км), со сгущением в русле р. Пур.

Площадки 1-5 расположены на правом берегу р Пур и не входят, в ярко выраженную на космоснимках, пойму реки. Площадки 6-10 находятся в пойме реки, которая выделяется бурной растительностью в отличие от берегов, причем площадка 7 находится непосредственно в середине русла, а 7-2 и 7-4 по краям русла (расстояние между этими площадками около 500 метров).

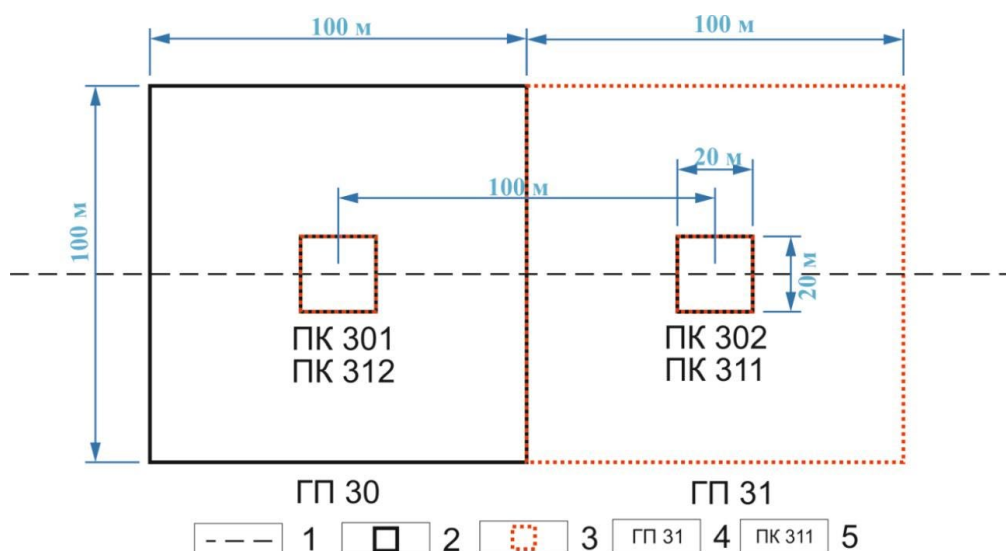


Рис. 2. Схема расположения генераторных и измерительных петель на площадке работ методом ЗСБ:

- 1 – направление профиля; 2 – расположение первой генераторной петли и её измерительных петель; 3 – расположение второй генераторной петли и её измерительных петель; 4 – номер генераторной петли;
5 – номер измерительной петли (пикета)

Измерения выполнены с помощью аппаратуры FastSnap [14]. Подбор одномерных геоэлектрических моделей в каждой точке зондирования проводился с помощью программы TEM-IP [3, 4].

Результаты

Анализ кривых становления электромагнитного поля показал, что результаты измерений вдоль профиля различаются в основном интенсивностью проявления индукционно-вызванной быстропротекающей поляризации (БВПИ), которое выражается появлением локального минимума на кривой ЭДС на временах переходного процесса около 0.1 мс.

На рисунке показаны типичные сигналы становления для пикетов с ВП и без ВП. Влияние ВП видно на временах примерно 0.1 мс, в виде резкого спада в узком временном интервале, либо двойной смене полярности кривой ЭДС. На кривых без заметного влияния ВП таких особенностей не наблюдается. Переходы сигнала становления через ноль на временах 0.1 мс типичный признак многолетнемерзлых пород [17], в которых ВП проявляется именно на этом времени. Из качественного анализа сигналов ЗСБ на всем профиле видно, что подбор моделей среды необходимо проводить с учетом влияния параметров вызванной поляризации.

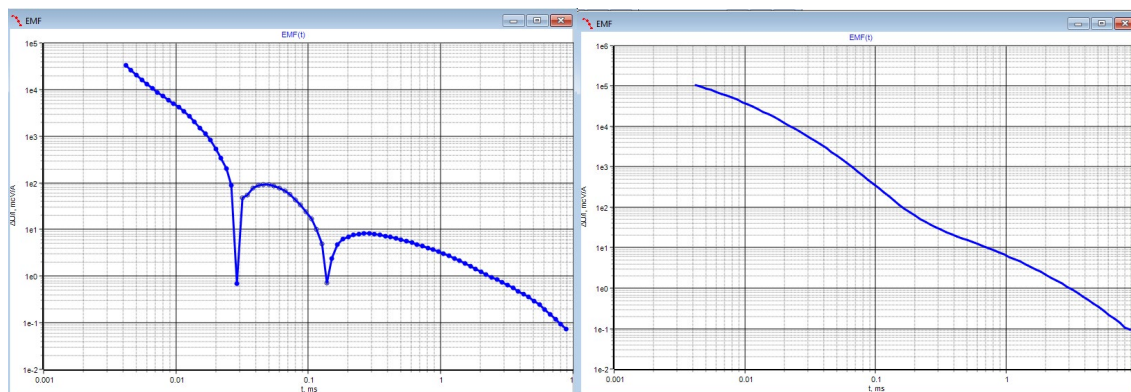


Рис. 3. Сигнал становления: слева - на пикете 801 не имеющий признаков присутствия ВП, справа - на пикете 1401 осложненный влиянием ВП

По виду кривых можно увидеть различия в сигналах, и соответственно в моделях среды для площадок 7, 7-2, 7-4, которые находились в русле реки (рис. 4), и для площадок (5 и 9), находившихся в пойме.

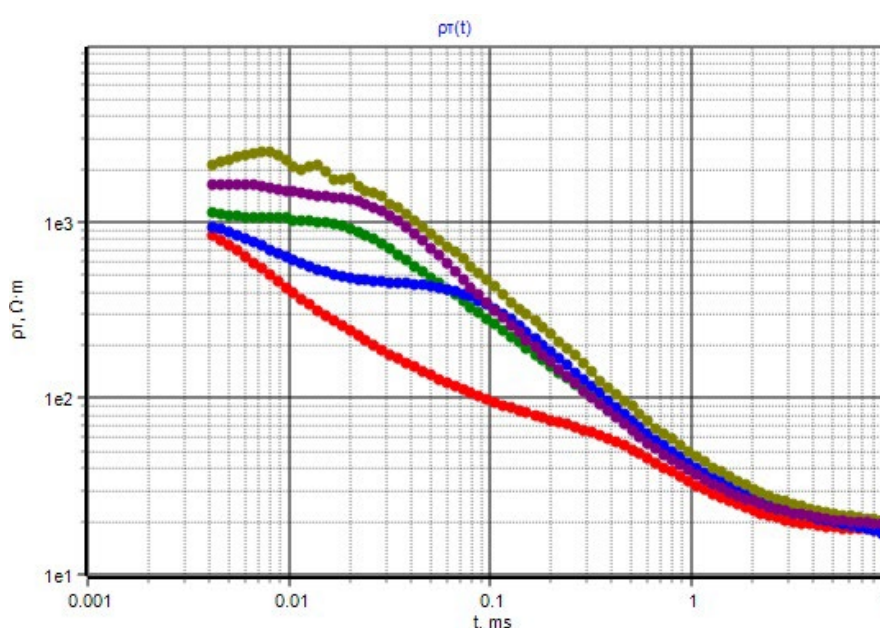


Рис. 4. Кривые кажущегося сопротивления для соосных измерений на площадках:

красная – 7 площадка (центр русла), синяя – 7-4 площадка (край русла),
зеленая – 7-2 площадка (край русла), фиолетовая – 5 площадка (пойма),
коричневая 9 площадка (пойма).

По кривым кажущегося сопротивления видно, что отличается только кривая измеренная по центру русла, ее уровень сопротивлений ниже, чем у остальных кривых, что может свидетельствовать о наличие подруслового сквозного талика, ширина которого не выходит за пределы русла.

По результатам инверсии в программе TEM-IP с учетом параметров вызванной поляризации получены 1D модели для всех точек измерения. На основе моделей, полученных по результатам инверсии, был построен предварительный интерпретационный разрез (рис. 5).

На интерпретационном разрезе показано криогенное состояние геологических образований. В основании разреза подмерзлотная толща, выше неё реликтовая многолетнемёрзлая толща. Реликтовые и современные многолетнемерзлые породы разделяет, предположительно, межмерзлотный талик или криопэг. С большей уверенностью, учитывая следы миграции солёной и пресной воды можно говорить о проявлении криопэга. Современную мерзлоту перекрывает сезонно талый слой. На разрезе показан гидрогенный подрусловой напорно-фильтрационный криогидрогалинный сквозной талик [11], пронизывающий современную и реликтовую многолетнемёрзлую толщу. Под хасырями выделены подозёрные застойные криогидрогалинные несквозные талики [11].

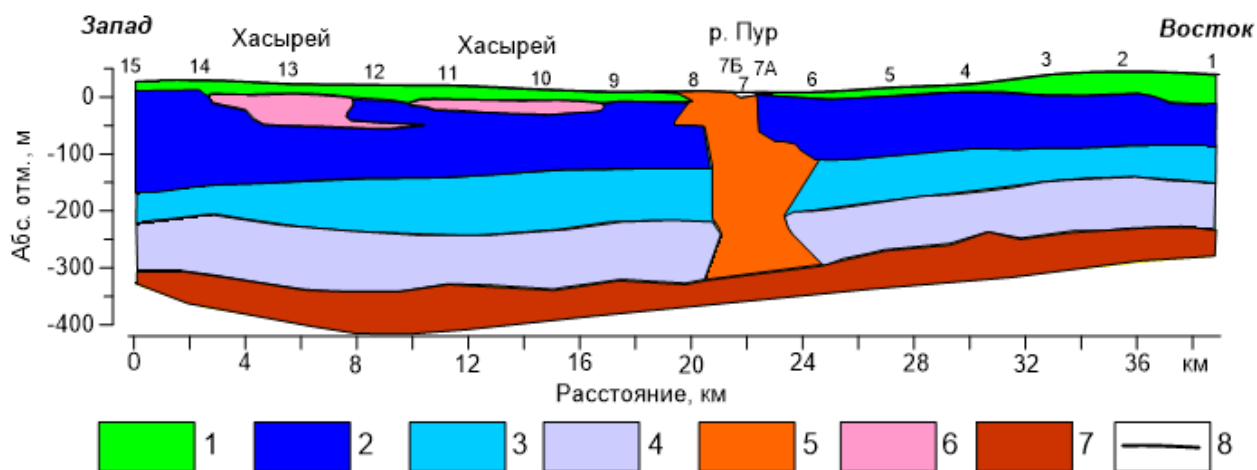


Рис. 5. Интерпретация результатов съёмки ЗСБ. 1 – сезонно-талый слой; 2 – современная многолетнемёрзлая толща; 3 – криопэг; 4 – реликтовая многолетнемёрзлая толща; 5 – подрусловой сквозной талик; 6 – подозёрный несквозной талик; 7 – подмерзлотная толща; 8 – границы криогенных образований

Заключение

Выполненные в долине р. Пур геофизические исследования методом ЗСБ позволили получить сведения о сложном строении криогенной толщи района. Использование метода ЗСБ подтвердило свою эффективность в разделении талых и мёрзлых горизонтов, а также поиске таликовых зон.

В результате получено строение ММТ в пределах линии съёмки, показано присутствие таликовой зоны под руслом реки, проходящей сквозь современную (резистивную) и реликтовую ММТ. Между современной и реликтовой мерзлотой выявлено развитие слоя, предположительно криопэга.

Благодарности

Полевые работы выполнены в рамках проекта Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра «Прогноз деградации мерзлоты и технология автоматизированного контроля несущей способности мёрзлых грунтов под объектами капитального строительства», обработка и интерпретация материалов проведена при поддержке программы фундаментальных научных исследований FWZZ-2026-0049.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агеев Д.В. Применение зондирования становлением поля для решения гидрогеологических задач в условиях криолитозоны на примере Новоуренгойского месторождения // Инженерные изыскания, 2019, т. 13, № 3, с. 40–49.
2. Агеев Е.В., Потапов В.В., Антонов Е.Ю., Шеин А.Н., Оленченко В.В. Широкая зональность строения многолетнемерзлой толщи Ямало-Ненецкого автономного округа по данным электромагнитных зондирований // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 5, с. 60–70. DOI: 10.15372/KZ20240505. EDN: DGDONM
3. Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А. Автоматизированная система для интерпретации данных индукционных импульсных электромагнитных зондирований с учётом индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика, 2014, т. 55, № 8, с. 1282–1293.
4. Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А., Эпов М.И. Программа для ЭВМ «ТЕМ-IP v2» // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022668984, 14.10.2022. Заявка № 2022668128/69 от 07.10.2022. URL: <https://fips.ru/EGD/f57ecc52-4dca-4943-8a74-f12cdc64d143>
5. Бадю Ю.Б. Криолитогенез. Признаки и призраки криолитосферы. М., Издательство Московского университета, 2021, 367 с.
6. Брадучан Ю.В., Василенко Е.П., Воронин А.С. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист Q-43 – Новый Уренгой. Объяснительная записка. СПб., Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015, 320 с.
7. Кожевников Н.О. Быстропротекающая индукционно-вызванная поляризация в мёрзлых породах // Геология и геофизика, 2012, т. 53, № 4, с. 527–540.
8. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1980. 391 с.
9. Лебедева Е.А., Файбусович Я.Э., Назаров Д.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000. Третье поколение. Серия Западно-Сибирская. Лист Q-44 – Тазовский. Объяснительная записка. СПб., Изд-во ВСЕГЕИ, 2020, 191 с.
10. Рекомендации по геофизическим работам при инженерных изысканиях для строительства (электроразведка) / ПНИИС. М., Стройиздат, 1984, 104 с.
11. Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны. М., Изд-во Моск. ун-та, 1983, 232 с.
12. Романовский Н.Н. Талики в области многолетнемерзлых пород и схема их подразделения // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология, 1972, № 1, с. 23–34.
13. Стогний В.В. Импульсная индуктивная электроразведка при изучении поляризующей среды криолитозоны Якутской кимберлитовой провинции // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 4, с. 46–56.
14. Шарлов М.В., Агафонов Ю.А., Стефаненко С.М. Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-ТЕМ и FastSnap. Эффективность и опыт использования // Приборы и системы разведочной геофизики, 2010, № 1 (31), с. 27–31.

15. Фотиев С.М. Гидрогеотермические особенности криогенной области СССР. М., Наука, 1978, 236 с.
16. Creighton A.L., Parsekian A.D., Angelopoulos M. Transient electromagnetic surveys for the determination of talik depth and geometry beneath thermokarst lakes // Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018, vol. 123. DOI: 10.1029/2018JB016121.
17. Kozhevnikov, N.O. On the association between fast induced polarization in frozen rocks and dielectric polarization of ice. // 2022, Geophysical Prospecting, 70, 1380–1387. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.13246>

© *Е. В. Агеенков, В. В. Потапов, В. В. Оленченко, Е. Ю. Антонов, 2026*