

Е. В. Агеенков^{1}, В. В. Потанов¹, Е. Ю. Антонов¹, А. Н. Шейн², В. В. Оленченко¹*

Региональные электроразведочные исследования криолитозоны на территории Ямало-Ненецкого автономного округа

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), г. Новосибирск, Российская Федерация

² ГАУ ЯНАО Научный центр изучения Арктики, г. Салехард, Российская Федерация

* e-mail: ageenkovev@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Объектом исследования является современное состояние многолетнемёрзлой толщи (ММТ) и оценки её трансформации в связи с современными климатическими изменениями в пределах Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО). Выполнены электромагнитные зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) и их инверсия на десяти площадках по субмеридиональному профилю от Сибирско-Увальского поднятия на юге до Пур-Тазовского междуречья на севере с шагом порядка 50 км. Проведена интерпретация геоэлектрических моделей и сравнение с построениями структуры многолетнемёрзлых пород по данным бурения, предоставленными Научным центром изучения Арктики из своего архива. В результате интерпретации геоэлектрических разрезов выделены современная и реликтовая многолетнемёрзлые толщи, межмерзлотный талик. Установлено, что современная подошва многолетнемёрзлых пород залегает на глубинах от 50 до 130 м. Сопоставление результатов современной съёмки с архивными геокриологическими разрезами не показало существенных различий в положении геокриологических границ. Наибольшие различия современных и архивных данных отмечены в северной части профиля, что, вероятно, связано с проявлением в данных ЗСБ увеличения засоленности пород.

Ключевые слова: многолетнемёрзлые породы, засоленные породы, реликтовая мёрзлая толща, электромагнитные зондирования, ЗСБ, ЯНАО

Е. V. Ageenkov^{1}, V. V. Potapov¹, E. Yu. Antonov¹, A. N. Shein², V. V. Olenchenko¹*

Regional electrical prospecting studies of the permafrost zone in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), Novosibirsk, Russian Federation

² Arctic Research Center, Salekhard, Russian Federation

* e-mail: ageenkovev@ipgg.sbras.ru

Abstract. The object of the study is the current state of permafrost and assessment of its transformation in connection with modern climate changes within the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. Electromagnetic soundings using field formation in the near zone (TEM) and their inversion were carried out at ten sites along the sub-meridional profile from the Siberian-Uvalsky uplift in the south to the Pur-Taz interfluvium in the north with a step of about 50 km. An interpretation of geoelectric models was carried out and a comparison with constructions of the structure of permafrost rocks based on drilling data provided by the Arctic Research Center from its archive. As a result of the interpretation of geoelectric sections, modern and relict permafrost strata and interpermafrost talik were identified. It has been established that the modern base of permafrost lies at depths from 50 to 130 m. Comparison of the results of modern surveys with archival geocryological sections did not

show significant differences in the position of geocryological boundaries. The greatest differences between modern and archival data are noted in the northern part of the profile, which is probably due to the manifestation of an increase in rock salinity in the TEM data.

Keywords: permafrost, saline rocks, TEM, Yamal-Nenets Autonomous Okrug

Введение

Широтная зональность многолетнемёрзлых пород Западно-Сибирской плиты широко изучена и описана в фундаментальных работах конца прошлого столетия, показаны региональные изменения мощности мёрзлой толщи, её структуры и положения подошвы [1, 2, 3]. Тем не менее, вследствие длительной интенсивной антропогенной нагрузки, а также глобальных климатических изменений, происходят трансформации границ многолетнемёрзлых пород (ММП), увеличение глубины сезонного оттаивания, формирование техногенных таликов и другие экзогенные процессы. Поэтому исследования любыми доступными методами, в том числе геофизическими, направленные на изучение современного состояния мёрзлой толщи, востребованы и актуальны.

Методы и материалы

Для прослеживания изменений в строении ММП в широтном направлении были выполнены электромагнитные зондирования методом ЗСБ по субмеридиональному профилю от г. Ноябрьск на юге до п. Тазовский на севере.

Полевые измерения проведены на 10 площадках, расположенных с шагом близким к равномерному – порядка 50 км. Измерения выполнены установкой с генераторной петлёй 100 × 100 м и тремя одновитковыми измерительными петлями размером 20 × 20 м. Две из них расположены с разносом 100 м, относительно центра источника, и одна соосна с генераторной петлёй (с разносом 0 м). Такая конфигурация генераторных и измерительных петель выбрана исходя из следующих соображений.

При измерениях методом ЗСБ над мёрзлыми породами помимо электромагнитного (ЭМ) становления поля возникает индукционно вызванная поляризация (ВПИ), так же сопровождающаяся ЭМ сигналом. Измерителями регистрируется специфический переходный процесс, связанный с тем и другим ЭМ явлением. Из теории и практики метода ЗСБ известно [4, 5, 6, 7 и мн. др.], что в случае, когда измерительная петля соосна генераторной, то сигнал ВПИ наибольшим образом проявляется в измерениях, что, в некоторых случаях, осложняет решение обратной задачи при количественной интерпретации. В случае же когда измеритель удалён от центра генераторной петли, проявление сигнала ВПИ ослабевает. Поэтому для определения проводящих свойств разреза в присутствии сигнала поляризации часто используют измерения на некотором удалении от центра источника.

Измерения сигналов переходных процессов выполнены с помощью электроразведочной станции Fast-Snap [8].

Подбор одномерных геоэлектрических моделей в каждой точке зондирования проводился с помощью программы TEM-IP [9]. Решение обратной задачи электромагнитных зондирований выполнялось с учётом ВПИ верхней части разреза. Учёт ВПИ при решении прямой задачи осуществляется путём использования комплексной удельной электропроводности, зависящей от частоты.

Анализ первичных данных позволил для инверсии сделать выбор общего временного интервала переходного процесса – от 1 мкс до 5 мс. Проявления ВПИ отмечались на всех площадках, за исключением второй. Погрешность аппроксимации экспериментальной кривой теоретической зависимостью составляла в среднем от 2 до 6%.

Результаты

В результате инверсии в рамках одномерной поляризующейся модели отдельных измерений на площадке были составлены геоэлектрические разрезы УЭС каждой из них.

На каждой площадке была выбрана геоэлектрическая модель, полученная для одного из соосных измерений, отражающая общее строение разреза для площадки – т.н. генерализованная геоэлектрическая модель. На основании этих моделей был построен геоэлектрический разрез для всего профиля, на котором выделяются особенности геоэлектрических характеристик каждой площадки (рис. 1).

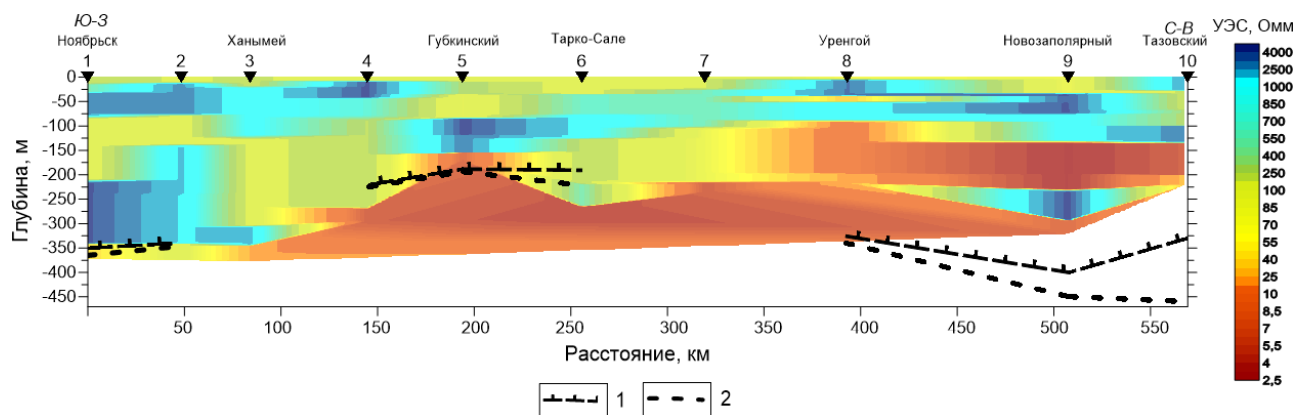


Рис. 1. Геоэлектрический разрез по профилю г. Ноябрьск - п. Тазовский: 1 – подошва ММП по архивным данным, 2 – подошва криолитозоны по архивным данным

Основание геоэлектрических моделей на площадках № 1 и № 2 более высокоомное, чем на остальных. Площадка № 1 находится в пределах структурно-тектонической и орографической зоны Сибирские увалы, площадка № 2 на её границе с Тазовско-Пурской низменностью. Причина повышения УЭС, возможно, связана с пониженной минерализацией подземных вод на этих глубинах по сравнению с центральной и северной частью профиля.

Положение кровли более проводящих пород в основании геоэлектрических моделей хорошо согласуется с подошвой ММП по данным архивных опорных геокриологических разрезов для площадок №№ 1-7.

На площадке № 8 вблизи п. Уренгой, по данным ЗСБ опорный проводящий горизонт выделяется с глубины 80-120 м, в то время как по архивным данным нижняя граница ММП установлена на глубине 325 м. Предположительно такое несоответствие объясняется тем, что опорный разрез значительно удалён от площадки и находится в 60 км к востоку, а в пределах исследуемой площадки, вероятно, на глубине присутствуют высокоминерализованные поровые воды.

На площадке № 9 условно выделена подошва ММП, однако её положение плохо согласуется с опорным разрезом, полученным на объекте № 13. Здесь по данным бурения в разрезе отсутствует межмерзлотный талик, а в геоэлектрических моделях площадки № 9 в диапазоне глубин от 120-130 м до 240-280 м выделяется хорошо проводящий слой с УЭС 3-4 Ом·м, что, по нашим предположениям, связано с проявлением криогалинных вод.

На геоэлектрическом разрезе площадки № 10 в районе п. Тазовский также присутствуют низкоомные слои с глубины 110-130 м, кровля которых залегает значительно выше подмерзлотной зоны, выделенной по архивным данным. Слои с УЭС 5-11 Ом·м вероятнее всего связаны с проявлением высокоминерализованных вод, а горизонты с УЭС 20-40 Ом·м представлены засоленными мёрзлыми породами и слоем реликтовых ММП. Хотя эти криогенные разности не отмечаются в описании разреза на объекте № 14, геоэлектрические модели на площадках №№ 8-10 хорошо согласуются с опубликованными результатами измерений методом ЗСБ, выполненных на Гыданском п-ове [10], где показано присутствие межмерзлотного талика с УЭС 8-20 Ом·м с кровлей на глубинах от 60 до 100 м, а реликтовые ММП выделяются по значениям УЭС от 30 до 40 Ом·м.

На геоэлектрических моделях площадок №№ 1-3 необходимо отметить повышенные значения УЭС слоёв, которые связаны с реликтовой мерзлотой, до 4500 Ом·м. Далее, по направлению на север, УЭС слоёв, интерпретируемых реликтовыми ММП, значительно снижается до 100-200 Ом·м и менее. Исключения составляют модели для площадок №№ 5 и 9, здесь уровень УЭС слоёв реликтовой мерзлоты высок – 3000-4500 Ом·м.

В результате обработки и анализа данных со всех площадок был построен интерпретационный разрез (рис. 2), на котором показана современная многолетнемерзлая толща с высокими УЭС порядка 1000 Ом·м и более, и реликтовая ММП, выделенная по УЭС 30-50 Ом·м. Кровля современных ММП закономерно погружается с севера на юг в интервале глубин от первых метров до 15 м.

Предполагаемая подошва реликтовой ММП в районе Ноябрьска и Ханымея выделяется на глубине около 350 м, однако поднимается до 200-250 м в средней части профиля, в пределах Надым-Пуровского междуречья. Одной из причин поднятия подошвы ММП может быть влияние газоносных структур [11], которые пересекают профиль в р-не Губкинского: для площадки № 4 – Комсомольское месторождение (объект № 6), для площадки № 5 – Губкинское месторождение (объект № 8). Возможно, что и реликтовые подрусловые талики также могут

влиять на положение подошвы ММП. Площадка № 6, на которой подошва ММП определена на глубине 260 м, расположена на правом берегу р. Пякупур в междуречье рр. Пякупур-Айваседапур. В границах Пур-Тазовского междуречья подошва реликтовых ММП погружается до глубины около 300 м.

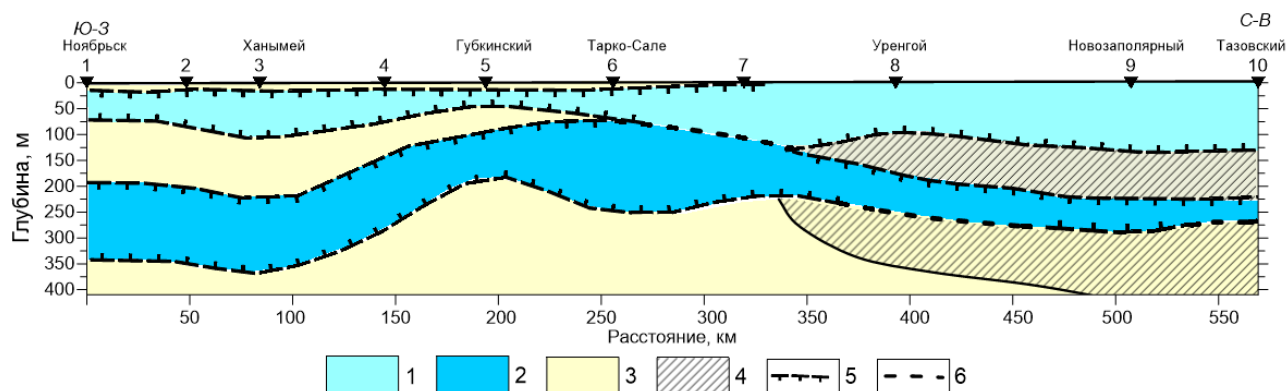


Рис. 2. Общий интерпретационный разрез по профилю г. Ноябрьск - п. Тазовский: 1 – современные ММП, 2 – реликтовые ММП, 3 – талые породы, 4 – охлаждённые породы; 5 – уверенная граница ММП, 6 – предполагаемая граница геокриологических разностей

Обсуждение

Положение подошвы ММП по инверсии измерений ЗСБ в южной и центральной части профиля (площадки №№ 1-7) в целом соответствуют архивным геокриологическим разрезам. В северной части профиля (площадки №№ 8-10), подошва ММП на опорных разрезах залегает на глубине около 350 м, в то время как по результатам наших исследований на глубине около 300 м.

В соответствии со схемой распространения и мощности подмерзлотных криопэггов [3] в северной части профиля широко распространены подмерзлотные криопэги мощностью от 50 до 200 м (реже более 200 м), и присутствуют мёрзлые засоленные породы [3, 12, 13]. Поэтому для получения объективной оценки современного положения подошвы ММП в северной части профиля и интерпретации измерений ЗСБ необходимо привлечение результатов комплексных каротажных измерений УЭС и термометрии по скважинам, расположенным вблизи площади наземных измерений. Такая априорная информация позволит сопоставить значения УЭС криогенных разностей, выделенных по скважине, с геоэлектрическими моделями, полученными по измерениям на поверхности.

В результате интерпретации данных ЗСБ в мёрзлой толще выделено присутствие межмерзлотного талика. Его мощность изменяется в широких пределах от около 50 м (Площадка № 5) до более 150 м (Площадка № 1 и № 9). При этом УЭС пород в межмерзлотном талике между г. Ноябрьск и г. Губкинский изменяется от 100-150 Ом·м, а между п. Уренгой и п. Тазовский от 3 до 10 Ом·м. Разница в УЭС пород межмерзлотного талика объясняется различием в их литологическом составе и минерализацией подземных вод. Для южной части профиля литологи-

ческий состав представлен песками четвертичного возраста, глинисто-песчаными отложениями и песками позднепалеогенового возраста [14]. Для северной части профиля породы межмерзлотного талика представлены глинами и песками раннепалеогенового возраста талицкой свиты [15, 16], обводнёнными высокоминерализованными водами. На геоэлектрических моделях нескольких площадок (№ 4, № 6 и № 7) мощный высокоомный слой с УЭС от 80 до 250 Ом·м не разделяется на слои реликтовых ММП и межмерзлотного талика.

Заключение

В результате интерпретации геоэлектрических разрезов выделены современная и реликтовая многолетнемёрзлые толщи, межмерзлотный талик. Установлено, что современная подошва многолетнемёрзлых пород залегает на глубинах от 50 до 130 м. Сопоставление результатов современной съёмки с архивными опорными геокриологическими разрезами не показало существенных различий в положении геокриологических границ. Хотя, нужно отметить значительное расстояние на профиле между площадками исследования, а также, зачастую, сильную удалённость мест расположения скважин с опорными разрезами от этих площадок. Наибольшие различия современных и архивных данных отмечены в северной части профиля, что вероятно связано с проявлением в данных ЗСБ увеличения засоленности пород.

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-2022-0024.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карта мощности и строения толщ ММП Западно-Сибирской плиты / Гл. ред. В. Т. Трофимов, В. В. Баулин. – М. : Главтюменьгеология; МГУ; ПНИИИС, 1984. – 1 л.
2. Трофимов В. Т. И др. Геокриологическое районирование Западно-Сибирской плиты. – М. : Наука, 1987. – 221 с.
3. Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Э. Д. Ершова. – М. : Недра, 1989. – 454 с.
4. Сидоров В. А. Импульсная индуктивная электроразведка. – М. : Недра, 1985. – 192 с.
5. Стогний В. В., Коротков Ю. В. Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов. – Новосибирск : Изд-во «Малотиражная типография 2D», 2010. – 121 с.
6. Кожевников Н. О. Быстропротекающая индукционно-вызванная поляризация в мёрзлых породах // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53. – № 4. – С. 527-540.
7. Каменецкий Ф. М., Тригубович Г. М., Чернышёв А. В. Три лекции о вызванной поляризации геологической среды. – Мюнхен, Вела Ферлаг, 2014. – 58 с.
8. 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. – № 01 (31). – С. 27-31.

9. 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.
10. Misyurkeeva N.; Buddo I.; Shelokhov I.; Smirnov A., Nezhdanov A., Agafonov Y. The Structure of Permafrost in Northern West Siberia: Geophysical Evidence // Energies. – 2022. – Vol. 15. – P. 2847.
11. Баду Ю. Б. Влияние газоносных структур на мощность криогенной толщи ямала // Криосфера Земли. – 2014. – Т. XVIII. – № 3. – С. 11-22.
12. Захаренко В. Н., Краковецкий Ю. К., Парначев В. П., Попов Л. Н. Об электропроводности многолетнемерзлых горных пород // Вестник Томского государственного университета. – 2012. – № 359. – С. 182-188.
13. Панькова Д. С., Оленченко В. В., Цибизов Л. В., Камнев Я. К., Шеин А. Н., Синицкий А. И. Строение многолетнемерзлой толщи в районе стационара Парисенто (Гыданский полуостров) по геофизическим данным // Криосфера Земли. – 2020. – Т. 24. – № 2. – С. 52-67.
14. Астапов А. П., Брадучан Ю. В., Боровский В. В., Воронин А. С. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист Р-43 – Сургут. Объяснительная записка. – СПб. : Картфабрика ВСЕГЕИ, 2012. – 342 с.
15. Брадучан Ю. В., Василенко Е. П., Воронин А. С., Горелина Т. Е. 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.
16. 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.

© Е. В. Агеенков, В. В. Потапов, Е. Ю. Антонов, А. Н. Шеин, В. В. Оленченко, 2024