

УДК 550.837:551.34(571.56)
DOI 10.17513/use.38455

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОМПЛЕКСНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ МЕТОДОВ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ТАЛИКА В МАССИВЕ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

¹Саввинов И.И., ²Куляндин Г.А.

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», Якутск,
Российская Федерация, e-mail: geophysicist@mail.ru;

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт горного дела Севера имени Н.В. Черского» Сибирского отделения
Российской академии наук, Якутск, Российская Федерация

Основной целью геофизических исследований, представленных в данной статье, является комплексный анализ и интерпретация результатов электроразведочных методов при исследованиях криолитозоны. Для оценки возможностей отдельных методов электроразведки при исследовании геокриологических свойств горных пород авторами выбран участок с известными параметрами криогенного состояния, включающий наличие линзы льда, а также локальной таликовой зоны. Геофизические измерения проведены электротомографией методом сопротивлений и вызванной поляризации, бесконтактным измерением электрического поля, георадиолокационным зондированием и методом естественного электрического поля. Полевые работы выполнены осенью при максимальной оттайке слоя сезонного промерзания и оттаивания. По результатам геофизических работ построены геоэлектрические разрезы значений удельного электрического сопротивления и вызванной поляризации, георадиолокационный разрез и кривая потенциала естественного электрического поля. Отмечено, что зоны преимущественно с низкими значениями удельного электрического сопротивления в 10–300 Ом·м и с высокими значениями поляризации (9–15 %) соответствуют талым породам, со значениями электросопротивления 300–1000 Ом·м при поляризации 5–9 % – пластично-мерзлым, а с высокими значениями сопротивлений, превышающими 1000 Ом·м, и низкими значениями вызванной поляризации (до 5 %) относятся к мерзлым, различной степени мерзлости и льдосодержания. Комплексный анализ данных электроразведочных исследований показал хорошую взаимозависимость разных электрофизических свойств горных пород при оценке их криогенного состояния. Полученные результаты электроразведочных методов показали высокую эффективность комплексного анализа для выявления в горных породах зон различного криогенного состояния массива.

Ключевые слова: линза льда, криолитозона, талик, электроразведка, электротомография, георадиолокация, бесконтактное измерение электрического поля, естественное электрическое поле

ASSESSMENT OF THE CAPABILITIES OF INTEGRATED ELECTRICAL PROSPECTING METHODS FOR DETECTING TALIKS IN PERMAFROST MASSIFS OF CENTRAL YAKUTIA

¹Savvinov I.I., ²Kulyandin G.A.

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov”, Yakutsk, Russian Federation, e-mail: geophysicist@mail.ru.

²Federal State Budgetary Scientific Institution «Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky» Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

The main objective of the geophysical studies presented in this article is a comprehensive analysis and interpretation of the results of electrical prospecting methods applied in cryolithozone research. To assess the capabilities of individual electrical methods for studying the geocryological properties of rocks, the authors selected a site with well-known parameters of the cryogenic state, including the presence of an ice lens and a local talik zone. Geophysical measurements were carried out using electrical resistivity tomography and induced polarization, non-contact electric field measurements, ground-penetrating radar, and the natural electric field method. Fieldwork was conducted in the autumn period, when the seasonally frozen layer reached its maximum thaw depth. Based on the results of geophysical investigations, geoelectric sections of electrical resistivity and induced polarization values were constructed, along with a ground-penetrating radar profile and a natural electric field potential curve. It was found that zones with predominantly low resistivity values of 10–300 ohm·m and high polarization values (9–15 %) correspond to thawed rocks; resistivity values of 300–1000 ohm·m with polarization values of 5–9 % correspond to plastic-frozen rocks; and high resistivity values exceeding 1000 ohm·m with low polarization (up to 5 %) correspond to frozen rocks with varying degrees of freezing and ice content. A comprehensive analysis of the electrical prospecting data revealed a strong correlation between different electrical properties of the rocks in assessing their cryogenic state. The results demonstrate the high effectiveness of the integrated geophysical approach for identifying zones of various cryogenic states within the rock mass.

Keywords: ice lens, cryolithozone, talik, electrical exploration, electrotomography, ground penetrating radar (GPR) method, contactless measurement of electric field, natural electric field

Введение

Многолетняя мерзлота – явление, в котором фактор времени имеет решающее значение. Границы распространения мерзлоты в естественных природных условиях и ее температурный режим непрерывно меняются. Особое внимание уделяется слою сезонного промерзания и оттаивания. Изучение криогенного состояния горных пород является важной составляющей в инженерно-геологических изысканиях при строительстве и эксплуатации инженерно-технических объектов, горнотехнических и гидротехнических сооружений [1–3]. Качественная оценка геокриологической обстановки объектов исследований дает возможность правильно определить наличие, характер и пределы распространения многолетней мерзлоты, выявить опасные процессы (например, криогенное выветривание, термокарст, мерзлотные трещины) и условия формирования рельефа и грунтов. Это позволяет принимать обоснованные решения по проектированию, строительству и эксплуатации объектов в условиях низких температур, что минимизирует риски и затраты, связанные с мерзлотными явлениями.

При определении формы и мощности многолетнемерзлых пород методы электроразведки успешно применяются в практике и обладают высокой эффективностью [4–6]. Это объясняется существенным различием электрофизических свойств мерзлых и талых пород, в первую очередь по удельному электрическому сопротивлению. Как известно, талые породы по результатам электроразведки методами сопротивлений выделяются низкими значениями удельного электрического сопротивления (УЭС) (ниже 300 Ом·м) и обладают хорошей проводимостью, тогда как мерзлые – значительно высокими (1000 Ом·м и более) [7]. Наличие низкопроводящих мерзлых пород и льдов при проведении электроразведки на постоянном токе уменьшает глубину исследований и делает невозможным определение мощности мерзлых пород. Вызванная поляризация (ВП) грунтов в различном криогенном состоянии также отличается. Многолетнемерзлые породы имеют низкие значения ВП – менее 5%, а таликовые – 9–12%, что дает возможность использования метода вызванной поляризации для геокриологического мониторинга [8]. Диэлектрическая проницаемость грунта зависит от пористости, влажности и в меньшей степени от минерального состава горных пород и составляет, например, для воды – 81, а для льда –

4 [9, с. 94]. Для изучения этого параметра используется метод высокочастотной электроразведки – георадиолокация [9, с. 88]. Также в качестве дополнительной информации для комплексного анализа возможно использование данных о естественном электрическом поле.

Цель исследования – комплексный анализ и интерпретация результатов электроразведочных методов, таких как электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации, бесконтактное измерение электрического поля, георадиолокация и метод естественного электрического поля, использованных при исследованиях криогенного состояния массива горных пород в Центральной Якутии.

Материалы и методы исследования

Для оценки возможностей отдельных методов электроразведки при исследовании геокриологических свойств грунтов авторами выбран участок с известными параметрами криогенного состояния, включающий наличие линзы льда, а также локальной таликовой зоны. Объект исследований расположен в окрестностях Якутска и представляет собой склон с заболоченным участком в низине (рис. 1).

Юго-восточная часть профиля представлена заболоченным рельефом с тонким слоем мха, под которым зафиксировано наличие линзы льда. Далее по профилю идет постепенное возвышение, где верхняя часть земной поверхности характеризуется слоем сухих песков. В центральной части профиля наблюдаются более влажные грунты, также с наличием тонкого слоя мха. Северо-западная сторона представлена мерзлыми породами различной степени льдистости.

Электротомография методами сопротивлений и вызванной поляризации [10] является основным эффективным инструментом для изучения криогенного состояния грунтов, но тем не менее обладает некоторыми недостатками. Современные многоэлектродные станции требуют качественного гальванического заземления электродов с переходным сопротивлением, не превышающим 10 кОм. Это указывает на то, что больше половины года в Якутии, когда верхняя часть земной поверхности в мерзлом состоянии, проведение электротомографии невозможно. Следует учитывать и наличие, например, на территориях капитального строительства асфальтобетонного покрытия, что также ограничивает проведение электротомографии.

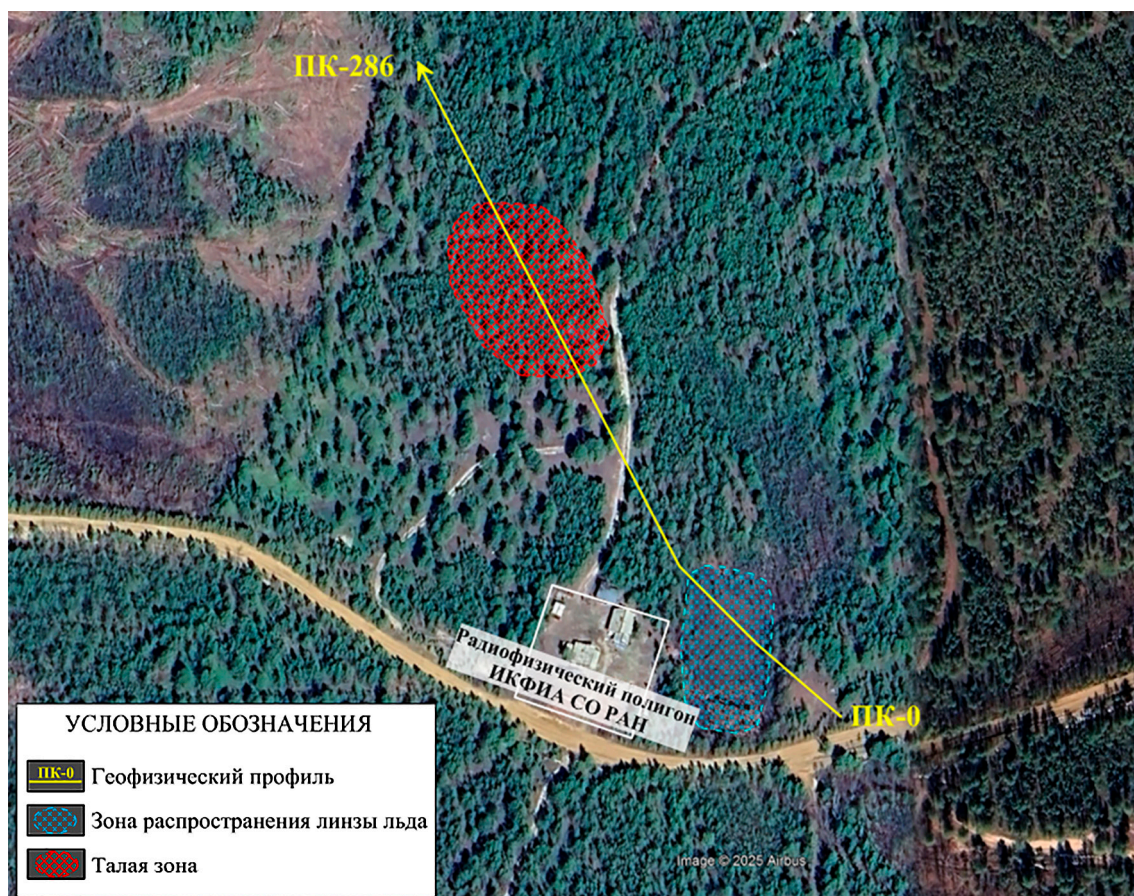


Рис. 1. Схема геофизического профиля
Примечание: составлен авторами на основе аэрофотоснимка Google Earth и по результатам данного исследования

Еще одним немаловажным недостатком является наличие металлических объектов на территориях исследований (подземные трубы, армированный бетон, сваи и другие металлические конструкции), что отразится на результатах ложными низкоомными аномалиями [11].

При проведении электротомографии методом сопротивлений использована 48-электродная 12-канальная станция «Скала-48к12» (ООО «КБ Электрометрии») с трехэлектродной установкой «поль-диполь» с шагом 2 м. Использование прямых и обратных трехэлектродных установок обеспечивает наибольшую глубинность и качество получаемого материала [12].

Бесконтактное измерение электрического поля (БИЭП) в отличие от электротомографии возможно применять на местах, где заземление электродов осложнено или невозможно [13]. Например, в зимний период при наличии сезонно-мерзлого слоя, на территориях с асфальтобетонным по-

крытием или в горных районах. При проведении работ методом БИЭП использована аппаратура «БИКС» (АО «СКБ сейсмического приборостроения») с дипольной осевой установкой с приемным и питающим диполями одинаковой длины.

Георадиолокационное зондирование [10, с. 88] основано на изучении криогенного состояния грунтов с помощью высокочастотных импульсных электромагнитных волн. Граница между сезонно-талым слоем и кровлей многолетнемерзлых пород на радарограммах отражается высоким контрастом, что дает высокую эффективность использования георадиолокации при исследованиях криолитозоны [14]. Основными недостатками метода являются его малая глубинность (до 15 м) и невозможность получить качественные материалы при наличии глинистых пород. Для проведения работ методом георадиолокации использовался георадар «ОКО-3» (ООО «Логические системы») с антенным блоком 100 МГц.

Основной задачей метода *естественного электрического поля (ЕП)* является выявление зон фильтрации подземных вод, например, при исследованиях состояния плотин гидротехнических сооружений, а также разведке месторождений рудных полезных ископаемых. В данной работе метод ЕП проведен способом градиента и использовался в качестве дополнительной информации для обобщенного анализа результатов комплексирования [15]. В качестве измерителя использовался цифровой мультиметр марки «ANENG» с неполяризующимися электродами шагом 10 м.

Результаты исследования и их обсуждение

Полевые работы комплексом электроразведочных методов выполнены осенью при максимальной оттайке слоя сезонного промерзания и оттаивания. По результатам выполненных работ построены геоэлектрические разрезы методом сопротивлений и вызванной поляризации, георадиолокационный разрез и кривая потенциала естественного электрического поля (рис. 2). Процедуры обработки и инверсии данных электротомографии методом сопротивлений и вызванной поляризации, а также бесконтактного измерения электрического поля выполнены в ПО x2ipi (МГУ, А.А. Бобачев) и zondres2d (А.Е. Каминский), с последующим экспортом в формат ПО Golden Software Surfer.

По результатам электротомографии методом сопротивлений и вызванной поляризации построены геоэлектрические разрезы с учетом изменения рельефа местности (рис. 2, А и Б). Максимальная глубина разреза достигнута в пределах 30–35 м. Как ранее было описано, области с относительно низкими значениями УЭС в 10–300 Ом·м с высокими значениями ВП (9–15%) соответствуют талым породам, 300–1000 Ом·м (5–9% ВП) – пластично-мерзлым, а с высокими значениями УЭС, превышающими 1000 Ом·м, и низкими ВП (до 5%) относятся к мерзлым, различной степени мерзлости и льдосодержания [7–8].

Юго-восточная часть профиля на геоэлектрическом разрезе характеризуется высокими значениями УЭС (более 2000 Ом·м) и низкой ВП (менее 1%), что подтверждает наличие линзы льда в интервале профиля 0–78 м. Далее по профилю в интервале 80–165 м наблюдается значительное понижение УЭС (300–1000 Ом·м) в верхней части разреза, что связано с залеганием сухих песков.

Средняя мощность данного слоя составляет 4 м. Глубже по разрезу зафиксирована низкоомная аномальная зона (менее 300 Ом·м) с высокими значениями ВП около 12%, связанная с наличием талых горных пород. В интервале профиля от 165–210 м наблюдаются низкие значения УЭС (менее 200 Ом·м) по всей глубине разреза с высокими значениями ВП (более 12%), что характерно для локальной таликовой зоны. Северо-западная часть профиля представлена высокими значениями УЭС (1000 Ом·м и более) и связана с наличием в верхней части разреза мерзлых пород средней мощностью 10 м.

Геоэлектрический разрез, полученный в результате бесконтактного измерения электрического поля (рис. 2, В), полностью повторяет результаты электротомографии методом сопротивлений. Максимальная глубина исследований по разрезу составила 13,5 м.

По данным георадиолокации построен георадиолокационный разрез с учетом изменения рельефа местности (рис. 2, Г). На отрезке, ориентировочно со 130 до 190 м, на радарограмме присутствуют сигналы-помехи от экранированных кабелей передачи данных. Электрофизические характеристики горных пород на месте исследований связаны со значениями вещественной части диэлектрической проницаемости. По ней определяется глубина зондирования на конкретном участке. Для данной местности средние значения диэлектрической проницаемости определены по волнам дифракции, образованным при отражениях от локальных неоднородностей в толще горных пород. На участке радарограммы выявлена гипербола, по которой с помощью соответствующей процедуры в ПО GeoScan32, путем наложения теоретической гиперболы, определено значение вещественной части диэлектрической проницаемости – 12. По разрезу прослежена граница сезонно-талого слоя на глубинах до 2,8 м. Граница этого слоя на волновой картине выделяется по протяженным осям синфазности, состоящим из последовательности высокоамплитудных сигналов одной фазы. Высокие значения амплитуд на границе талых и мерзлых пород связаны с контрастом в значениях вещественной части диэлектрических проницаемостей: низких значений для мерзлых и высоких – для талых, увлажненных. Увлажнение происходит на границе сезонно-талого слоя в результате накопления влаги от осадков на водоупоре, который образован мерзлыми породами [16].

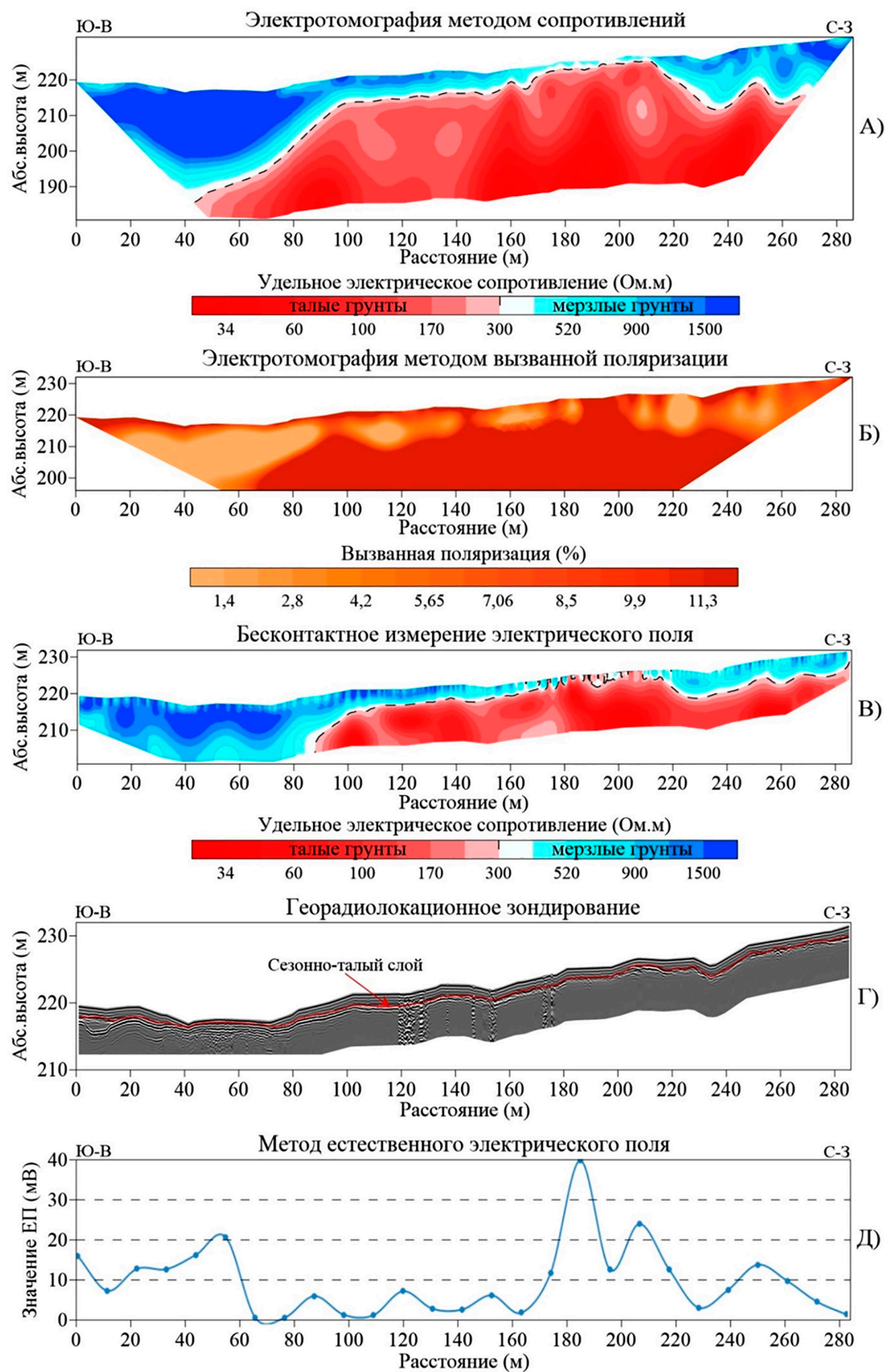


Рис. 2. Результаты геофизических исследований
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

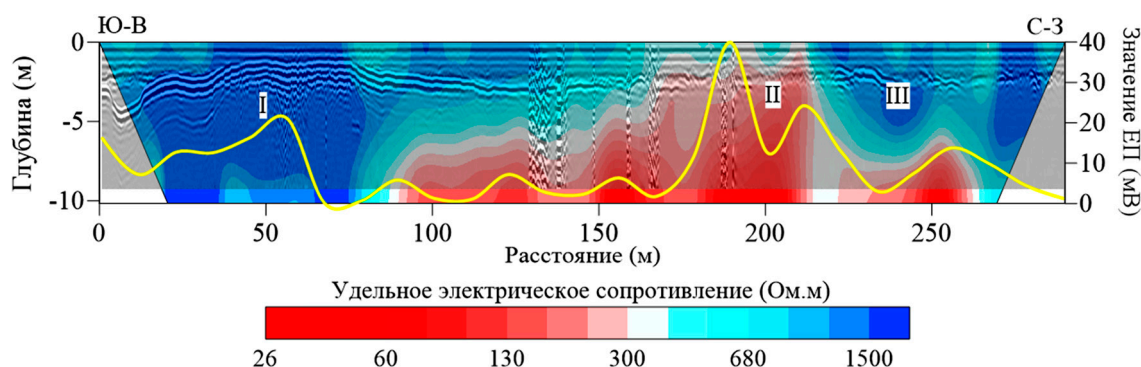


Рис. 3. Сопоставление результатов электротомографии методом сопротивлений, георадиолокационного зондирования и метода естественного поля
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Особенно контрастно прослеживается эта граница на участке болотистой местности (33–80 м), где под небольшим слоем мха залегает пластовый лед. Такие же контрастные оси синфазности, но с меньшей кратностью прослеживаются на отрезках 0–33 и 80–98 м – по краям от болота, что может быть связано с высокой льдистостью пород в отражающем слое. С началом подъема на возвышенность на отметке 150 м граница сезонно-талого слоя выделяется в основном по прерывистым осям синфазности с переменной контрастностью, так как отражения местами становятся слабыми или вовсе пропадают, что можно интерпретировать как отсутствие резко изменяющихся свойств горных пород с глубиной.

По результатам измерений методом естественного электрического поля получена кривая потенциалов ЕП (рис. 2, Д). Интервал профиля 0–60, где зафиксировано наличие льда под тонким слоем мха с определенной влажностью, характеризуется значениями потенциалов от 7,5 до 20 мВ. Далее по профилю в интервале профиля 60–170 в зоне сухих песков фиксируются значения потенциалов близких к нулю с незначительными изменениями (0,8–6,2 мВ). Таликовая зона, отражающаяся на геоэлектрических и георадиолокационных разрезах по данным ЕП выделяется высокими значениями потенциалов (от 12,8 до 40 мВ). Северо-западная часть профиля, где по данным электротомографии методом сопротивлений выявлена высокоомная зона мерзлых пород, характеризуется значениями потенциалов от 1,6 до 14 мВ, что аналогично юго-восточной части.

При комплексном анализе полученных материалов проведено сопоставление результатов электроразведочных методов. Как

можно наблюдать на рис. 3, болотистый участок (33–80 м) и прилегающая к нему территория (0–33 и 80–98 м) характеризуются приведенными выше описаниями по каждому методу и соответствуют мерзлому массиву пород (зона I) на всю исследуемую глубину. Мерзлый массив на возвышенности (220–280 м) отличается прерывистыми отражениями от сезонно-талого слоя по данным георадиолокации и различными зонами УЭС в диапазоне 400–1500 Ом·м по данным электротомографии (зона II). Предположительно, на этом участке сезонное накопление влаги происходит неравномерно из-за склона и растительности, что в дальнейшем приводит к изменению электрофизических свойств под влиянием талика внутри массива, в окрестности пикета 250. Таликовая зона III (90–270 м), в своем максимальном проявлении, отображается на отрезке 180–210 м. Она выделяется резким повышением значений потенциалов (от 12,8 до 40 мВ) по данным ЕП и низкими значениями УЭС (менее 200 Ом·м), практически по всей глубине разреза. На данных георадиолокации этот участок отличается снижением интенсивности отражений электромагнитных волн от подошвы сезонно-талого слоя, а на отрезке 190–210 м эта граница практически не прослеживается. При этом, опираясь на данные электротомографии, можно сделать вывод, что на участке 190–210 м имеется сквозной талик.

Выводы

Полученные результаты геофизических наблюдений показали эффективность комплексирования электроразведочных методов для оценки криогенного состояния грунтов. Сопоставление данных отдельных методов исследования разных электрофизи-

ческих параметров горных пород позволяет получать более полное и точное представление о геокриологической обстановке изучаемой территории.

Проведенные исследования показали, что зоны с наличием мерзлых пород и линзы льда характеризуются высокими значениями УЭС (от 1000 Ом·м) при низких показаниях ВП (до 5%), а таликовые зоны – низкими значениями УЭС (до 300 Ом·м) со значительно высокими ВП (9–15%). Георадиолокационное зондирование позволило выявить границу слоя сезонного оттаивания, где на радарограмме с высоким контрастом отражаются зоны с наличием линзы льда и мерзлых пород. В интервале профиля 150–210 м граница сезонно-талого слоя выделяется в основном по прерывистым осям синфазности с переменной контрастностью, что объясняется слабыми отражениями или их отсутствием на границе подошвы сезонно-талого слоя и зоны талика. Метод измерения естественного электрического поля также показал результативность в представлении дополнительной информации о сквозной таликовой зоне в виде высоких значений потенциалов – 12,8–40 мВ. Таким образом, комплексный анализ данных электроразведочных исследований показал хорошую сопоставимость разных электрофизических свойств горных пород при оценке их криогенного состояния.

Заключение

Использование комплекса электроразведочных методов в составе инженерно-геологических изысканий для оценки геокриологической обстановки территории дает более точное представление о криогенном состоянии грунтов, чем монометоды. Это способствует принятию более обоснованных решений при проектировании инженерно-технических, гидротехнических, горнотехнических и других сооружений в зоне вечной мерзлоты. Изучение разных электрофизических параметров электромагнитного поля (удельное электрическое сопротивление, вызванная поляризация, диэлектрическая проницаемость, естественные потенциалы) дает возможность детально обследовать массив на наличие таликовых зон, линз льда, криопэгов и других опасных объектов в криолитозоне.

Список литературы

1. Соловьев Е.Э., Саввин Д.В., Федорова Л.Л. Исследование геокриологических условий массива многолетнемерзлых пород неразрушающими электромагнитными методами // Горный журнал. 2019. № 2. С. 31–37. URL:

<https://www.rudmet.ru/catalog/journal/1796> (дата обращения: 20.09.2025). DOI: 10.17580/gzh.2019.02.06.

2. Нерадовский Л.Г. Опыт применения георадиолокации на Северо-Востоке Якутии // Инженерные изыскания. 2013. № 2. С. 26–37. URL: https://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-inzhenerye-izyskaniya-22013 (дата обращения: 20.09.2025).

3. Великин С.А. Возможности использования геофизических методов при изучении состояния гидротехнического сооружения в криолитозоне на примере накопителя минерализованных вод Тымтайдаах // Инженерные изыскания. 2013. № 9. С. 52–59. URL: https://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-inzhenerye-izyskaniya-92013 2 (дата обращения: 22.09.2025).

4. Дмитриев Ю.Ю. Применение электроразведки при инженерных изысканиях в криолитозоне // Инженерная геология. 2008. № 1. С. 56–60. URL: https://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-inzhenernaya-geologiya-12008 (дата обращения: 22.09.2025).

5. Шестернев Д.М., Омеляненко П.А. Повышение эффективности реализации инженерно-геофизических методов при исследовании грунтов криолитозоны // Вестник Забайкальского государственного университета. 2018. Т. 24. № 1. С. 41–50. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32580379> (дата обращения: 22.09.2025). DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-1-41-50.

6. Попов С.В., Кашкевич М.П., Романова Н.Е., Малышева А.М., Лебедева Л.С. Выявление субэкранных таликов геофизическими методами в средней части бассейна р. Лена, Центральная Якутия // Записки Горного института. 2025. Т. 274. С. 63–75. URL: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16396?setLocale=ru_RU (дата обращения: 25.09.2025).

7. Саввинов И.И., Федорова Л.Л. Мониторинг изменения строения бугров пучения методами электроразведки в Чурапчинском районе Якутии // Успехи современного естествознания. 2024. № 12. С. 119–125. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38358> (дата обращения: 23.09.2025). DOI: 10.17513/use.38358.

8. Хасанов И.М., Волков В.Н. Использование геофизических методов для изучения криогенного состояния пород разрабатываемых золоторудных месторождений Магаданской области // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2021. № 1. С. 30–39. URL: http://vestnik.north-east.ru/2021/n1/ft_Khasanov.pdf (дата обращения: 25.09.2025). DOI: 10.34078/1814-0998-2021-1-30-39.

9. Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. М.: ГЕОС, 2017. 240 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://geos-books.ru/vladov-m-l-sudakova-m-s-georadiolokac> (дата обращения: 22.09.2025).

10. Бобачев А.А., Горбунов А.А. Двумерная электроразведка методом сопротивлений и вызванной поляризации: аппаратура, методики, программное обеспечение // Разведка и охрана недр. 2005. № 12. С. 52–54. URL: <http://rion-journal.com/issues/free> (дата обращения: 22.09.2025).

11. Судакова М.С., Брушков А.В., Великин С.А., Владов М.Л., Зыков Ю.Д., Неклюдов В.В., Оленченко В.В., Пушкарев П.Ю., Садуртдинов А.Г., Скворцов А.Г., Царев А.М. Геофизические методы в геокриологическом мониторинге // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2022. № 6. С. 141–151. URL: <https://vestnik.geol.msu.ru/jour/article/view/551> (дата обращения: 22.09.2025).

12. Лазурченко А.В., Шойхонова Т.С., Шкиря М.С., Белова А.Ю., Терешкин С.А. Оценка возможности поиска подземных вод методом электротомографии по данным численного моделирования в условиях, осложненных многолетнемерзлыми породами (на примере территории восточной части Республики Бурятия) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 7. С. 81–95. URL: <https://elibrary.ru/contents.asp?id=68584404> (дата обращения: 22.09.2025). DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4348.

13. Модин И.Н., Груздев А.И., Скобелев А.Д. Сравнение бесконтактных электроразведочных комплексов // Инженерные изыскания. 2016. № 2. С. 46–53. URL: https://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-inzhenernye-izyskaniya-2201 (дата обращения: 22.09.2025).

14. Федорова Л.Л., Куляндин Г.А., Прудский Н.Д. Определение участков талых пород в многолетнемерзлом массиве по данным георадиолокации // Успехи современного естествознания. 2023. № 11. С. 192–198. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38163> (дата обращения: 24.09.2025). DOI: 10.17513/use.38163.

15. Ефремов И.Д., Большаков Д.К., Модин И.Н. Извлечение информации о естественном поле из данных электро-

томографии для решения инженерно-геологических задач // Вестник Филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. 2022. Т. 1. № 2 (23). С. 103–112. URL: <https://msu.tj/file/vestnik/vestnik2022-en-t1-23.pdf> (дата обращения: 22.09.2025).

16. Козлов В.И., Баишев Д.Г., Павлов Е.А., Федорова Л.Л., Куляндин Г.А. Естественные потенциалы в криолитозоне 2017–2024 // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: материалы XXX Юбилейного Международного симпозиума (г. Санкт-Петербург, 01–05 июля 2024 г.). Томск: Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, 2024. С. 859–863. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=76064478> (дата обращения: 25.09.2025). DOI: 10.56820/OAO30D12.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0020, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800086-1) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Financing: The work was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. 0297-2021-0020, EGISU R&D No. 122011800086-1) using the equipment of the Central Research Center of the YANGTSE SB RAS.