

doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-463-470



ИНФОРМАТИВНОСТЬ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ГОСУДАРСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ ФОНОВОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ (НА ПРИМЕРЕ МЕТЕОСТАНЦИИ СОПОЧНАЯ КАРГА)

✉ Балихин Е.И.^{1,2}, Кошурников А.В.^{1,2}, Борисик А.Л.³

¹ ООО «МГУ-геофизика», Москва, Россия

² МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ ФГБУ «АНИИ», Санкт-Петербург, Россия

✉ ermolaybalihin@mail.ru

В данной работе исследуются возможности применения методов электроразведочных изысканий для изучения распространения и строения многолетнемерзлых пород (ММП) в условиях сложных геокриологических условий. Проведенные вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) вблизи метеостанции «Сопочная Карга» выявили аномальные зоны с нехарактерными значениями удельного электрического сопротивления (УЭС), первоначально предполагающие наличие сложного чередования мерзлых и талых пород. Однако данные бурения и термометрии подтвердили наличие сплошных мерзлых толщ, что указывает на влияние пространственных структур в виде обширной сети ледяных клиньев на результаты электроразведки. Результаты подчеркивают необходимость комплексного подхода, сочетающего электроразведочные методы с бурением и термометрией, а также разработки адаптированных методик электроразведки для повышения точности и надежности исследований ММП, в ходе организации специализированных мониторинговых площадок.

Ключевые слова: *Таймыр, многолетнемерзлые породы, геофизика, вертикальное электрическое зондирование, подземный лед*

Введение. Для изучения распространения и строения многолетнемерзлых пород (ММП) часто используются методы электроразведочных изысканий. Эти методы считаются одними из наиболее эффективных для получения представительной картины распределения ММП, поскольку зоны повышенного удельного электрического сопротивления (УЭС) обычно коррелируют с присутствием мерзлых пород.

Однако, применение электроразведки сопряжено с рядом проблем, особенно в условиях сложных геокриологических условий. Одной из основных проблем является неоднозначность интерпретации данных, что может приводить к ошибочным выводам о структуре и состоянии ММП особенно в отсутствии априорной информации о геолого-геофизическом строении территории. Дополнительно, наличие трещин, каналов и засоленных растворов в льдогрунте может существенно влиять на результаты измерений, снижая точность и надежность получаемых данных.

В данной работе рассматриваются результаты геофизических исследований, проведенных в сложных районах распространения многолетнемерзлых пород, с целью анализа возможностей применимости методов электроразведки для изучения геокриологических особенностей данного региона.

Материалы и методы. Участок исследования расположен вблизи морской гидрометеорологической станции «Сопочная Карга» (рис. 1). Станция находится на мысе Сопочная Карга, представляющем собой серповидную аккумулятивную косу, сложенную песком с редкой галькой и заваленную плавником [Гусев, 2011], вытянутую с севера на юг длиной 1800 м и шириной 300–400 м. К востоку между мысом и берегом простирается бухта Сопочная Карга. Площадка расположена в зоне сплошного распространения ММП, и на сегодняшний день проведен ряд работ [Стрелецкая и др., 2007; Стрелецкая и др., 2009], посвященных изучению строения подземных льдов, сложности и их распространению в данном регионе.

Целью электроразведочных исследований методом ВЭЗ на участках выбранных для размещения пунктов мониторинга, является определение наличия в разрезе мерзлых пород, глубины залегания их кровли, а также выявление возможных внутренних таликов [РД 52.17.925-2023]. В рамках данной площадки проводились исследования с использованием комплекса генератора «ASTRA-100» и измерителя «APL-02». Съемка осуществлялась с применением симметричной установки Шлюмберже с шагом АВ/2: 1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 10; 15; 20; 30; 40; 50, 60, 70, 80, 90, 100 метров. что обеспечивало исследование профиля до глубины 30 метров ниже дневной поверхности. Всего было выполнено три ВЭЗ с шагом 50м на площадке работ. Типичная кривая приведена на рисунке 2.

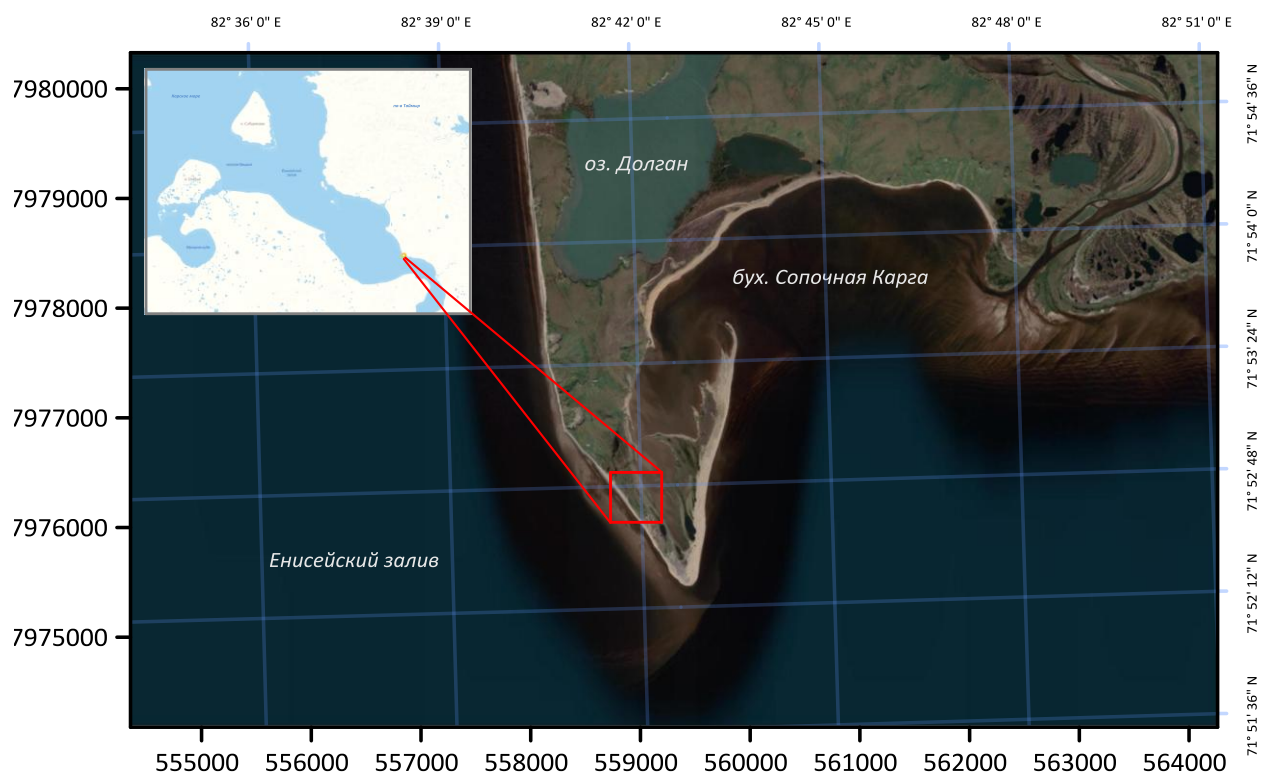


Рис. 1. Район проведение исследования.

Результаты исследований. По результатам выполненных измерений в камеральных условиях были вычислены значения кажущегося электрического сопротивления, характеризующие интегральные значения УЭС горных пород в области исследования. Область исследования располагается под центром установки и простирается от поверхности до глубины, примерно равной одной трети половины длины установки (АВ/2).

Полученные кривые ВЭЗ не типичны для зон сплошного распространения ММП. На них наблюдаются резкая смена показателей УЭС, что свидетельствует о сложном строении изучаемой толщи и наличии аномальных зон.

Согласно литературным данным [Фролов, 2005; Зыков, 2007], сопротивление мерзлых незасолённых пород должно находиться в диапазоне от 250 до нескольких тысяч Ом·м. Однако по результатам одномерной инверсии получены нехарактерные значения УЭС для зон распространения ММП: первый слой обладает УЭС до 180 Ом·м (мощность 0.7м), второй слой — до 2 Ом·м (мощность 1.3 м) , третий слой — 600 Ом·м (мощность 3м) , четвертый слой — 6 Ом·м (мощность 83 метра).

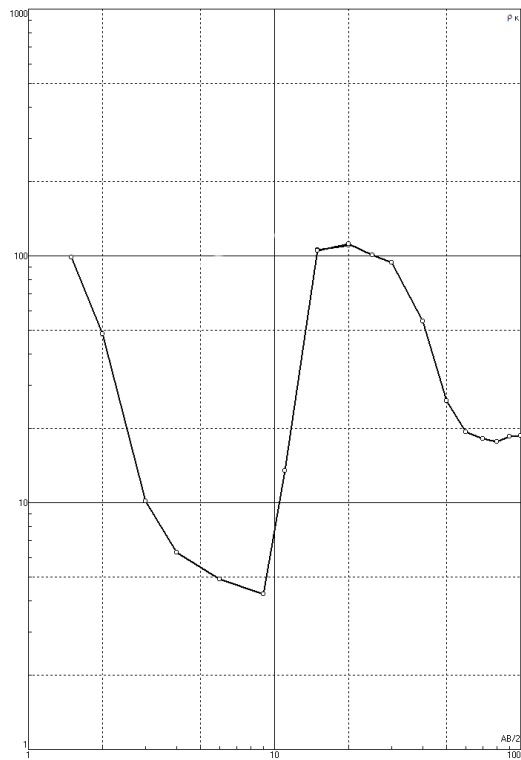


Рис. 2. Полевая кривая, полученная в ходе геофизических исследований методом ВЭЗ.

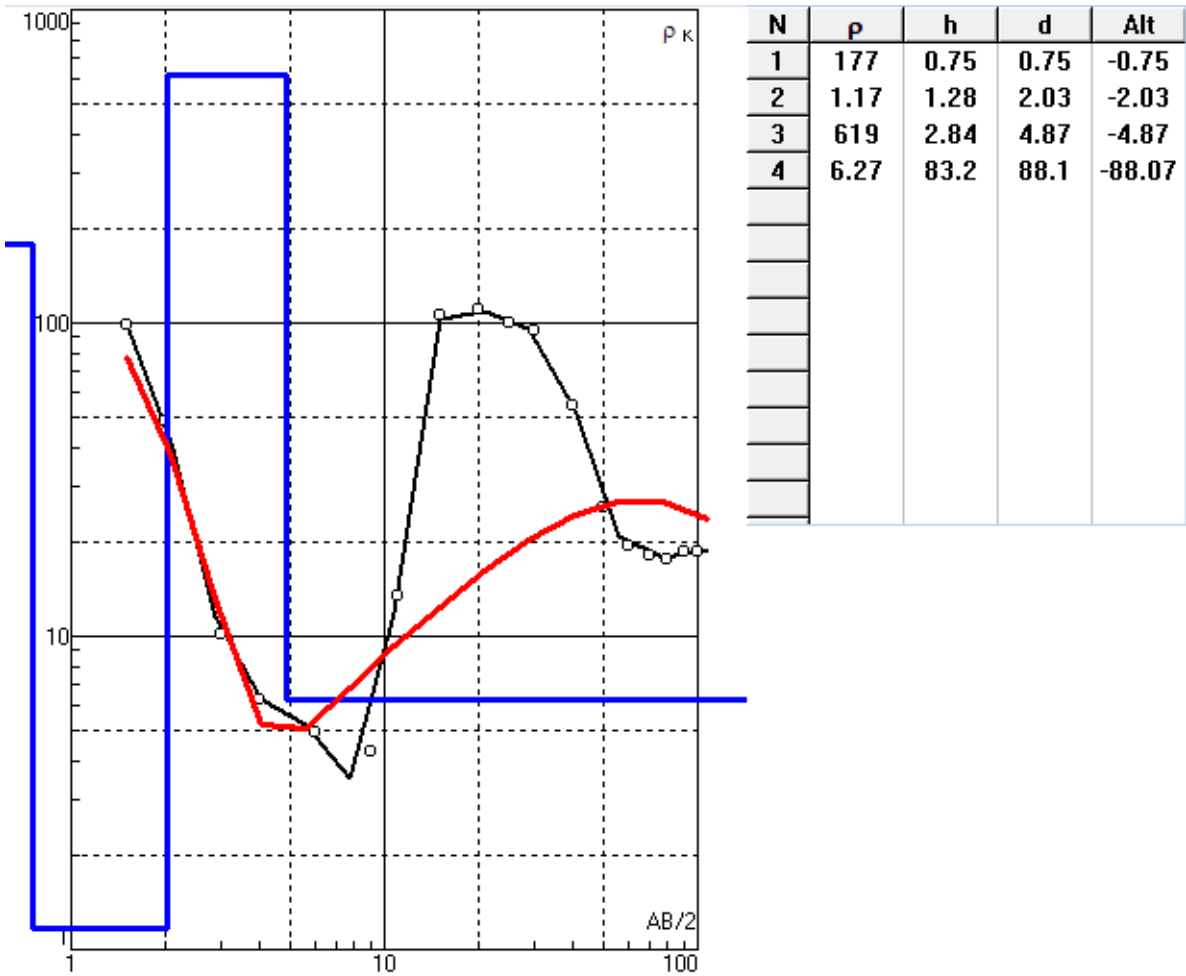


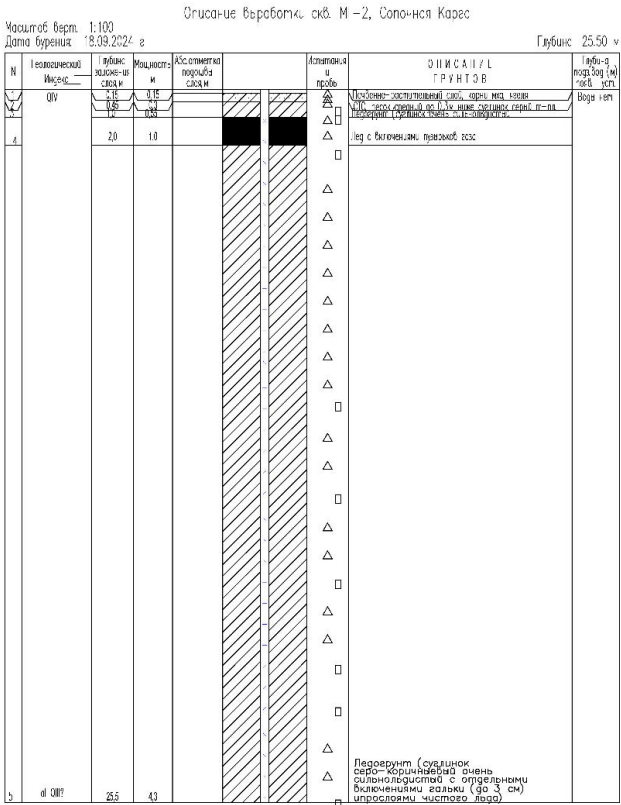
Рис. 3. Результат одномерной инверсии данных ВЭЗ.

Согласно литературным данным [Фролов, 2005; Зыков, 2007], сопротивление мерзлых незасолённых пород должно находиться в диапазоне от 250 до нескольких тысяч Ом·м. Однако по результатам одномерной инверсии получены нехарактерные значения УЭС для зон распространения ММП: первый слой обладает УЭС до 180 Ом·м (мощность 0.7м), второй слой - до 2 Ом·м (мощность 1.3 м) , третий слой - 600 Ом·м (мощность 3м), четвертый слой - 6 Ом·м (мощность 83 метра).

Опыт проведения аналогичных исследований показывает, что наличие столь низких значений УЭС может свидетельствовать о присутствии талых или засоленных пород. Однако результаты бурения (рис. 3) выявили сплошное распространение мерзлых толщ с глубины 0,3 метра, существующих при отрицательных температурах. При проведении корреляции данных бурения и результатов геофизических исследований установлено, что первый слой (УЭС 180 Ом*м) соответствует почвенно - растительному слою и слою сухого песка, второй слой (УЭС 2 Ом·м) — слою льда, третий слой (УЭС 600 Ом·м) относится к суглинку с включениями гальки и щебня, что объясняет повышенные значения УЭС, четвертый слой (УЭС 6 Ом·м) соответствует льдогрунту с прослоями суглинка. Это несоответствие между полевыми данными и результатами бурения может быть обусловлено специфическими геокриологическими условиями, такими как наличие крупных вертикальных объектов и обширной сети трещин в льдогрунте, с высокопроводящим заполнителем. Эти особенности приводят к занижению значений УЭС и появлению аномальных зон при проведении геофизических исследований методом ВЭЗ.



А)



Б)

Рис. 4. а) фото керна с глубины 0-1м, при производстве буровых работ вблизи метеостанции Сопочная Карга; б) описания выработки СКВ. МГ-2, Сопочная кара.



Рис. 5. Наличие трещинного льда, подтвержденное бурением. Глубина 1-2 м

В подтверждение наличия крупных ледяных трещиноватых структур на участке исследования можно привести образцы керна льда, выход которых был не единым монолитом, а в раздробленном состоянии (рис. 4). Данные бурения выполненного на исследуемой территории свидетельствуют о наличии крупной сети жильных льдов, что дополнительно объясняет аномальные результаты геофизических исследований методом ВЭЗ. Природа этих льдов связана, вероятно, связана с широким распространением едомской свиты в этом районе [Стрелецкая и др., 2007]. При бурении скважины фиксировался сильный запах органических остатков. Так как предположительно, характер пространственного расположения обширной сети ледяных клиньев не однороден, и ввиду большого разброса (до 200 метров) установки ВЭЗ, происходит интегральное наложение характеристик среды с различными показателями электропроводимости, что в конечном итоге дает искажённую картину геоэлектрического строения для одной точки зондирования.

Схожие трудности в сопоставлении результатов ВЭЗ и данных бурения были встречены в районе метеостанции «Игарка». Характер кривой ВЭЗ полностью соответствует эталонному варианту распределения УЭС в районах существования слоя высокольдистых ММП (рис.5).

При проведении одномерной инверсии было выделено три слоя. Относительно низкоомный слой №1 (УЭС до 650 Ом*м) мощностью 0.7 м, высокоомный слой №2 (УЭС до 14500 Ом*м) мощность до 16 м, подстилающий низкоомный слой №3 (УЭС до 400 Ом). Бурение скважины в районе метеостанции «Игарка» подтвердило глубину до кровли высокоомного слоя. Начиная с глубин 0,7 м были вскрыты многолетнемерзлые породы, как и предполагалось по интерпретации ВЭЗ. Однако, по результатам проведения буровых работ, на глубине 10 метров был вскрыт скальный грунт (рис.6). В виду того, что скальный грунт обладает схожими значениями УЭС, интерпретации результатов ВЭЗ с геокриологической точки зрения становится затруднительна, и не позволяет выделять границы морозный скальный грунт - высокольдистые ММП. Тип кривой ВЭЗ на метеостанции «Игарка» свидетельствует о горизонтальном геоэлектрическом разрезе,

отсутствии резких вертикальных неоднородностей, в отличие от ВЭЗ на метеостанции «Сопочная Карга».

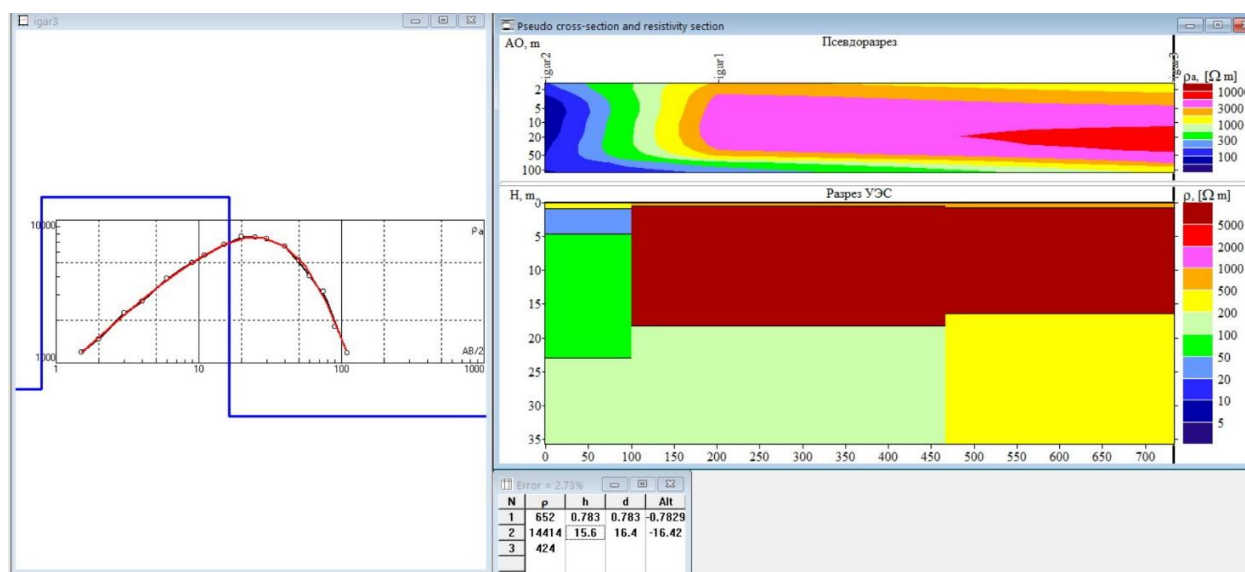


Рис. 6. Геоэлектрический разрез и кривая ВЭЗ на участке метеостанции «Игарка».



Рис. 7. Керн скального грунта с глубины 10м, метеостанция «Игарка».

Приведенные результаты свидетельствуют о существенных ограничениях применения метода ВЭЗ при исследовании многолетнемерзлых пород в условиях сложных геокриологических структур, таких как наличие крупных вертикальных объектов (или структур) в виде ледяных клиньев, осложнённых повышенной трещиноватостью, присутствием засоленных пород, а также наличием скальных пород. Эти ограничения связаны, как с проблемами решения геофизической задачи, так и со слабой контрастностью некоторых пород по физическим свойствам, что приводит к неточностям в интерпретации геолого-геокриологических условий, особенно в условиях отсутствия априорной информации о геолого-геофизическом строении изучаемой территории. Нехарактерные значения УЭС, полученные в районах с известным наличием мерзлых толщ, указывают на необходимость более комплексного подхода к интерпретации данных и комплексирования с другими геофизическими методами. Такой подход должен включать использование априорной информации о строении разреза, корреляцию с результатами бурения и термометрии для повышения точности и надежности получаемых данных. Кроме того, специфические геокриологические условия могут требовать адаптации существующих методов электроразведки, разработки новых методик и применения площадных съёмок, способных учитывать влияние пространственных аномалий. Это позволит улучшить качество геофизических исследований ММП и обеспечить более точное понимание геокриологических процессов в исследуемых районах.

Заключение. Метод ВЭЗ широко применяемый при геофизических исследованиях, в том числе для выделения мерзлых толщ, дает положительные результаты в случае относительно однородного геокриологического строения разреза и отсутствия вертикальных контактов. В то же время, проведенные геофизические исследования продемонстрировали, что данный метод электроразведки, имеет ряд ограничений при исследовании ММП в условиях сложных геолого-геокриологических структур. В частности, наличие неоднородного распространения едомных отложений, осложненных наличием вертикальных ледяных жил может приводить к неоднозначным результатам, снижая точность и надежность получаемых данных. Также было выделено, что при проведении исследований в районах распространения скальных пород, есть риск неправильного выделения границы между многолетнемерзлой толщей и скальной породой, или же отсутствия первых вовсе.

Для повышения точности и надежности исследований ММП методами электроразведки рекомендуется использовать комплексный подход, сочетая электроразведочные методы с прямыми методами исследования, такими как бурение и термометрия, для калибровки и верификации данных; создавать и применять специализированные методики электроразведки, учитывающие влияния пространственных аномалий на электрические свойства грунтов; повышать плотность электрических зондирований для более детального выявления мелких аномалий и структурных особенностей ММП; включать в исследование другие геофизические методы, такие как электротомография, георадиолокация или электромагнитное профилирование, для получения более полной картины геокриологических условий; а также подчеркивать важность проведения непосредственного бурения и температурных замеров в скважинах для подтверждения и уточнения результатов электроразведочных изысканий. Эти меры позволят повысить достоверность и точность геофизических исследований ММП при организации мониторинговых площадок, обеспечивая более надежную основу для оценки геокриологических условий и планирования мероприятий по мониторингу и защите окружающей среды.

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (Соглашение №169-15-2023-001 от 01.03.2023 года Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды).

ЛИТЕРАТУРА

Гусев Е.А. Наблюдения за геоморфологическими процессами на севере Западной Сибири (на примере района Сопочной Карги) // Успехи современного естествознания. 2011. № 9. С. 19-22.

Стрелецкая И.Д., Гусев Е.А., Васильев А.А., Каневский М.З., Аникина Н.Ю., Деревянко Л.Г. Новые результаты комплексных исследований четвертичных отложений западного Таймыра // Криосфера Земли. 2007. Т. XI. №3. С. 14-28.

Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Гусев Е.А., Каневский М.З., Медведева М.А., Ваништейн Б.Г., Черкашев Г.А., Большиханов Д.Ю. Четвертичные отложения, подземные льды и динамика берегов Западного Таймыра. В кн.: «Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития». // М.: Изд-во Моск. ун-та, 2009, с. 357-372.

Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. 2-е изд., перераб. и доп. Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2005. 607 с.

Зыков Д.Ю. Геофизические методы исследования криолитозоны. Москва: Изд-во Московского ун-та, 2007. 264 с.

РД 52.17.925-2023 Руководство по организации и осуществлению Государственного фоновом мониторинга состояния многолетней мерзлоты на государственной наблюдательной сети. СПб., 2023. 42 с.

INFORMATIVE VALUE OF GEOPHYSICAL METHODS FOR THE TASKS OF STATE GEOCRYOLOGICAL MONITORING (USING THE EXAMPLE OF THE SOPOCHNAYA KARGA WEATHER STATION)

Balikhin E.I.^{1,2}, Koshurnikov A.V.^{1,2}, Borisik A.L.³

¹ LLC "MSU-Geophysics", Moscow, Russia

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³ Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

This paper explores the possibilities of using electrical exploration methods to study the distribution and structure of permafrost rocks (MMP) under difficult geocryological conditions. Conducted vertical electrical soundings (VES) near the Sopochnaya Karga weather station revealed abnormal zones with uncharacteristic values of electrical resistivity (UES), initially suggesting the presence of a complex alternation of frozen and thawed rocks. However, drilling and thermometry data confirmed the presence of solid frozen strata, which indicates the influence of spatial structures in the form of an extensive network of ice wedges on the results of electrical exploration. The results emphasize the need for an integrated approach combining electrical exploration methods with drilling and thermometry, as well as the development of adapted electrical exploration techniques to improve the accuracy and reliability of MMP studies, during the organization of specialized monitoring sites

Keywords: *Taimyr, permafrost, geophysics, vertical electric sounding, underground ice*

REFERENCES

Gusev E.A. Observations on geomorphological processes in the north of Western Siberia (on the example of the Sopochnaya Karga region) // *Successes of modern natural science*. 2011. No. 9. P. 19-22.

Streletskaya I.D., Gusev E.A., Vasiliev A.A., Kanevsky M.Z., Anikina N.Yu., Derevyanko L.G. New results of complex studies of quaternary deposits of the western Taimyr // *Cryosphere of the Earth*. 2007. Vol. XI. No.3. P. 14-28.

Streletskaya I.D., Vasiliev A.A., Gusev E.A., Kanevsky M.Z., Medvedeva M.A., Vanstein B.G., Cherkashev G.A., Bolshiyakov D.Yu. Quaternary deposits, underground ice and dynamics of the shores of the Western Taimyr. In the book: "The Laptev Sea system and the adjacent Arctic seas: the current state and history of development". Moscow: Publishing House of Moscow. Unita, 2009, p. 357-372.

Frolov A.D. Electrical and elastic properties of frozen rocks and ice. 2nd ed., reprint. and add. Pushchino : ONTI PNC RAS, 2005. 607 p.

Zykov D.Y. Geophysical methods of cryolithozone research. Moscow: Publishing House of the Moscow University, 2007. 264 p.

RD 52.17.925-2023 Guidelines for the organization and implementation of State background monitoring of the state of permafrost on the state observation network. St. Petersburg, 2023. 42 p.