



ПОЛОЖЕНИЕ КРОВЛИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД И ИХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА (НА ПРИМЕРЕ БАСЕЙНА РЕКИ МАЛАЯ ГРАВИЙКА, РАЙОН ГОРОДА ИГАРКА)

✉ Андрюшин Д.С.¹, Разумовский Р.О.¹, Сидорова Т.А.²

¹ Игарская геокриологическая лаборатория ИМЗ СО РАН, Игарка, Россия

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

✉ andriushinds@mail.ru

Исследование посвящено определению положения кровли высокотемпературных многолетнемерзлых пород (ММП) и их геоэлектрических свойств на территории бассейна реки Малая Гравийка в районе города Игарка. В ходе работы были проведены полевые измерения методом дипольного индуктивного профилирования, что позволило установить глубину залегания кровли ММП в различных типах ландшафтов. Результаты показали существенную пространственную изменчивость степени деградации ММП: наибольшие значения мощности сезонно-талого слоя обнаружены на севере и западе территории, а наиболее стабильные торфяные комплексы расположены на востоке участка. Корреляционный анализ выявил сильную связь ($R=0.78$) между электропроводностью грунта и глубиной кровли ММП, отражающую влияние состава и льдистости пород. В фиксированных аномальных зонах с высоким сопротивлением, вероятно, сохраняются остаточные массы подземных льдов, что является редкостью для данного района ввиду деградации ММП в голоцене. Полученные данные демонстрируют перспективность электромагнитных методов для оценки неоднородности мерзлых и сезонно-талых массивов в условиях климатических изменений.

Ключевые слова: *многолетнемерзлые породы, сезонно-талый слой, дипольное индуктивное профилирование, деградация мерзлоты, геоэлектрические свойства*

Введение. При освоении территорий, характеризующихся развитием высокотемпературных многолетнемерзлых пород (ММП) с прерывистым и островным их распространением, большое значение имеет определение глубины залегания кровли мерзлоты и выявление таликовых зон. Основу данного исследования составляют ретроспективные данные, полученные группой исследователей с участием сотрудников Игарской геокриологической лаборатории свыше 20 лет назад [Rodionov et al, 2007]. Значительная пространственная изменчивость геокриологических условий обуславливает необходимость применения экспресс-методов определения свойств массива, таких, как геофизические, и, в частности, дипольного индуктивного профилирования (ДИП), позволяющего бесконтактным способом получать геоэлектрические свойства среды. Геофизические исследования массивов мерзлых грунтов (ММГ) являются на сегодняшний момент одними из ключевых способов выявления неоднородностей, т.к. буровые работы нередко выполнять сложно, невозможно или очень дорого. Особенно большая изменчивость наблюдается в бассейнах рек, где сложная конфигурация подземного и надземного стока может приводить к неожиданным закономерностям распределения талых и мерзлых зон [Лебедева и др., 2019; Попов и др., 2025].

Район исследования. Территория исследования представляет собой западную часть бассейна р. Малая Гравийка в 5 км на северо-запад от г. Игарка в пределах ангутихинской озерно-ледниковой равнины [Варганов и др., 2018]. Участок характеризуется наличием разнообразного ряда ландшафтных разностей: плоскобугристого грядово-мочажинного комплекса с тундровой и лесотундровой растительностью, включающей березы; елово-лиственничного редкостойного леса; елово-березового редколесья на месте гари, возникшей в середине 1960-х годов.

В пределах грядово-мочажинного комплекса располагается площадка CALM R40 [<https://www.permafrost.org>]. Она предназначена для измерения максимальной мощности

СТС и была заложена в 2008 г. В 2006 г., т.е. до ее создания, была пробурена скважина глубиной 10 м, находящаяся в центральной части площадки.

В верхней части разрез до глубины 1.1 м представлен светло-коричневыми суглинками с высоким содержанием органики. Ниже, до 2.8 м располагается серая, сильнольдистая супесь (до 40%) со слоистой криотекстурой и редкой органикой; до 4.7 м – темно-коричневые суглинки пластичномерзлые. С глубины 4.7 м – супеси с редкими включениями и прослоями гальки и гравия, криотекстура становится массивной. Органика встречается редко, преимущественно в виде фрагментов древесины, с глубиной ее содержание падает. Наличие суглинков пластичномерзлой консистенции также указывает на высокие температуры грунта, близкой к температуре его замерзания, которая для суглинков ниже по сравнению с супесями. Среднегодовые температуры грунтов в верхней части разреза – до 2 м – являются положительными. С глубины 4 – 5 м температуры стабильно изменяются в пределах -0.2 – (-0.3) °C (рис. 1).

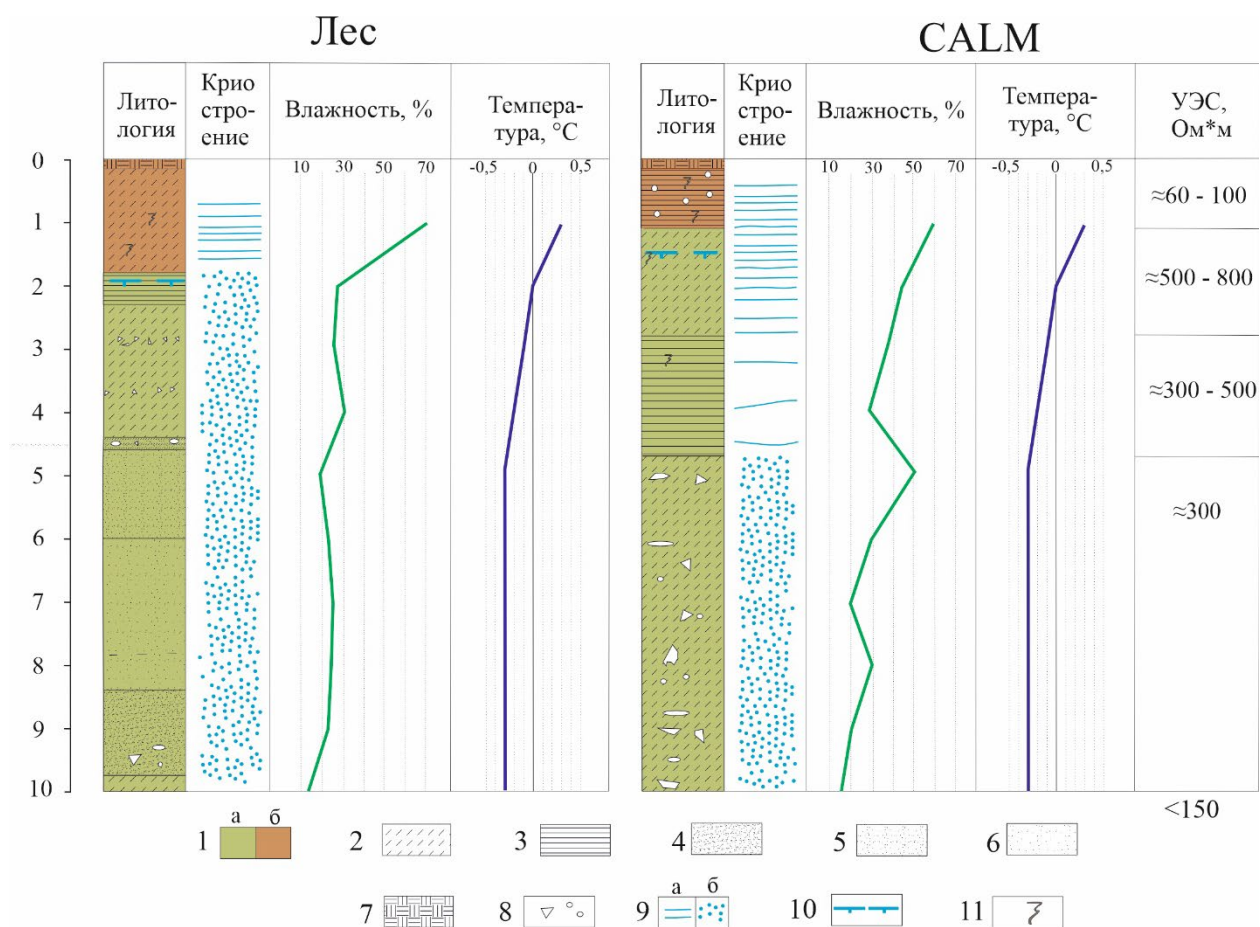


Рис. 1. Литологические колонки с данными влажности, температуры и УЭС (удельного электрического сопротивления грунтов): 1 – генетические типы отложений: а) флювиогляциальные, б) болотные; 2 – супеси; 3 – суглинки; 4 – пески пылеватые; 5 – пески мелкие; 6 – пески средней крупности; 7 – торфяно-моховый слой; 8 – включения гравия и гальки; 9 – криогенные текстуры: а) слоистая, б) массивная; 10 – кровля многолетнемерзлых отложений; 11 – примеси органического вещества.

Генетически верхний суглинистый горизонт формировался в современных субэаральных условиях; следующие за ним супесчано-суглинистые горизонты, по-видимому, можно отнести к водно- и/или озерно-ледниковым. Слабольшдистые с массивной криотекстурой супеси широко представлены в районе и сформированы флювиогляциальными потоками.

Материалы и методы. Во второй половине сентября проводились работы по измерению глубины залегания кровли ММП с помощью стального щупа длиной 170 см на

месте промеров ранее выполненных работ по 168 точкам, размещенным в виде сетки 50×50 м [Rodionov et al, 2007]. В пределах площадки CALM было проведено измерение по 121 точке в рамках ежегодного мониторинга. Электроразведочные работы проводились методом ДИП установкой ЕМ34-3. Местоположение точек в пространстве фиксировалось GPS приемником.

Измерения на площадке CALM проводились на каждой точке промера глубины кровли ММП разносами кос 10 и 20 м горизонтальным (HD) и вертикальным диполем (VD). Всего было выполнено 484 зондирования в 121 точке. Горизонтальный диполь (HD) при разnose 10 м дает эффективную глубину зондирования на глубине 0 – 4 м, при разnose 20 м – 0 – 8 м. Вертикальный диполь (VD) имеет эффективную глубину зондирования при разnose 10 м и пике 4 м – 2 – 8 м, а при разnose 20 м и пике 8 м – 4 – 16 м [McNeill, 1980].

Для корректной интерпретации результатов ДИП были выполнены зондирования непосредственно возле трех термометрических скважин глубиной 10 метров, что позволяет связать состояния грунтов (мерзлое/талое) с их геоэлектрическими свойствами. Скважины располагались в пределах CALM на торфяном бугре, в лесу на водоразделе, а третья находилась вне площадки исследований, но при этом характеризовалась положительными температурами по всей глубине.

На основе данных замеров кровли ММП был проведен корреляционный анализ для 10 м разноса HD, позволяющий оценить связь глубины залегания кровли ММП и электропроводности грунтов в пределах площадки CALM. Проводился визуальный анализ космических снимков высокого разрешения Corona 1960-х гг. и современных снимков для оценки ландшафтных изменений, которые могли оказать влияние на состояние верхней части разреза ММП. В июне 2025 после схода снега выполнена аэрофотосъемка района площадки CALM R40 БПЛА DJI Mavic 20, на ее основе в Agisoft Metashape была создана цифровая модель рельефа с разрешением 0.5 м/пикс.

Результаты и обсуждение. На основе выполненных промеров глубины кровли ММП в пределах площадки CALM и западной части бассейна р. Малая Гравийка составлены карты глубины залегания ММП, по которым было проведено сравнение с ранее выполненными исследованиями [Rodionov et al, 2007] (рис. 2).

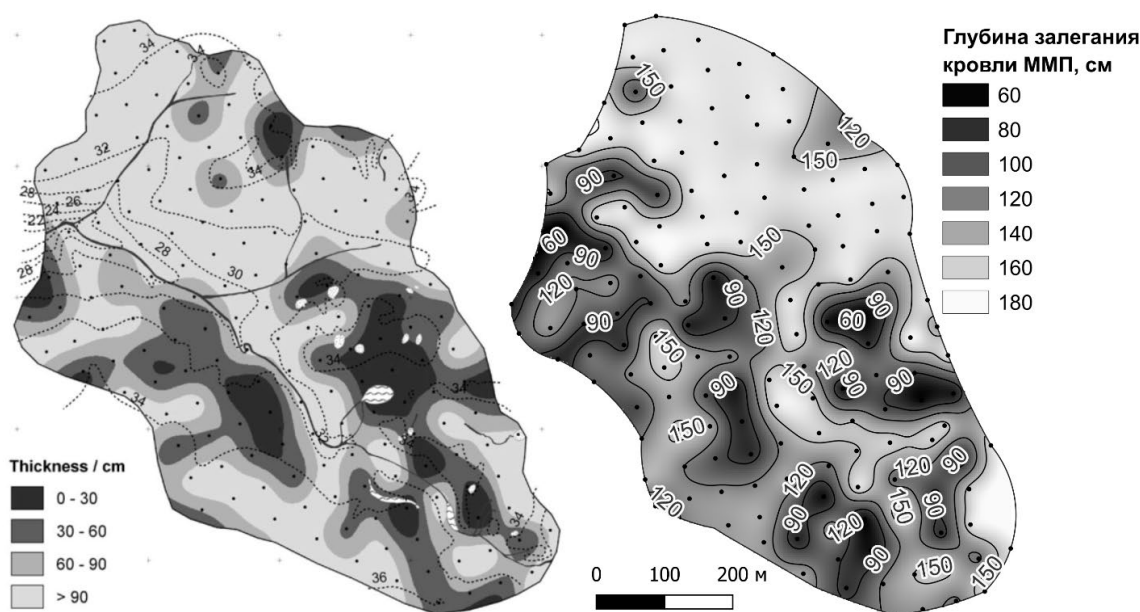


Рис. 2. Мощность сезонно-талого слоя на август 2003 г. [Rodionov et al, 2007] (слева); на сентябрь 2025 (справа).

Ключевой проблемой результатов исследования, выполненного в 2003 г., по мнению авторов, стало слишком раннее измерение глубины залегания ММП. На основе разовых ежемесячных замеров на площадке CALM 2023 – 2024 г. было показано, что глубина промерзания на склонах торфяников и в мочажинах составила 40 – 50 см. За период с августа по конец сентября протаивание на участках со сливающимися ММП (торфяные бугры) увеличивается еще на 20 – 30 см. Если к данным протаивания СТС можно применить экстраполяцию, то отделить положение не полностью протаявшей части СМС от кровли ММП данным методом невозможно. В целом, в данной работе не делался акцент на мощности деятельного слоя, он был дан как некоторый фон.

На момент сентября 2025 г. распределение наиболее деградировавших и наиболее стабильных участков имеет схожий характер, но абсолютные значения отличаются, что также связывается с длиной щупа. В 2003 г. использовался щуп длиной 90 см, в 2025 – 170 см. Абсолютные значения глубины горизонта выше кровли сезонномерзлого грунта (в данном случае не кровли ММП, а остатка СМС) на 2003 г. в 2–3 раза меньше, чем измеренная мощность СТС в 2025 г., что свидетельствует именно о неправильной оценке и интерпретации данного параметра. Иначе такое изменение вызвало бы активное развитие геокриологических процессов, чего не наблюдается на настоящий момент времени.

В целом, северная часть исследуемой территории является наиболее деградировавшей и в настоящий момент характеризуется глубиной залегания ММП от 150 см до предела измерений в 170 см. Южная и западная части отличаются промежуточным состоянием с отметками кровли 90 – 150 см. Наиболее стабильные мерзлотные условия наблюдаются в пределах площадки CALM.

На площадке CALM R40 наибольшая глубина залегания кровли ММП – более 150 см – приурочена к мочажинам и прилегающим участкам, а также отмечается на участке поймы р. Малая Гравийка в южной части. Наименьшая глубина (от 60 до 90 см) зафиксирована на склонах южной и юго-восточной экспозиции, где происходит интенсивное сдувание снега в зимний период (рис. 3), что согласуется с данными метеостанции Игарка и снегомерными работами 2024 – 2025 гг.

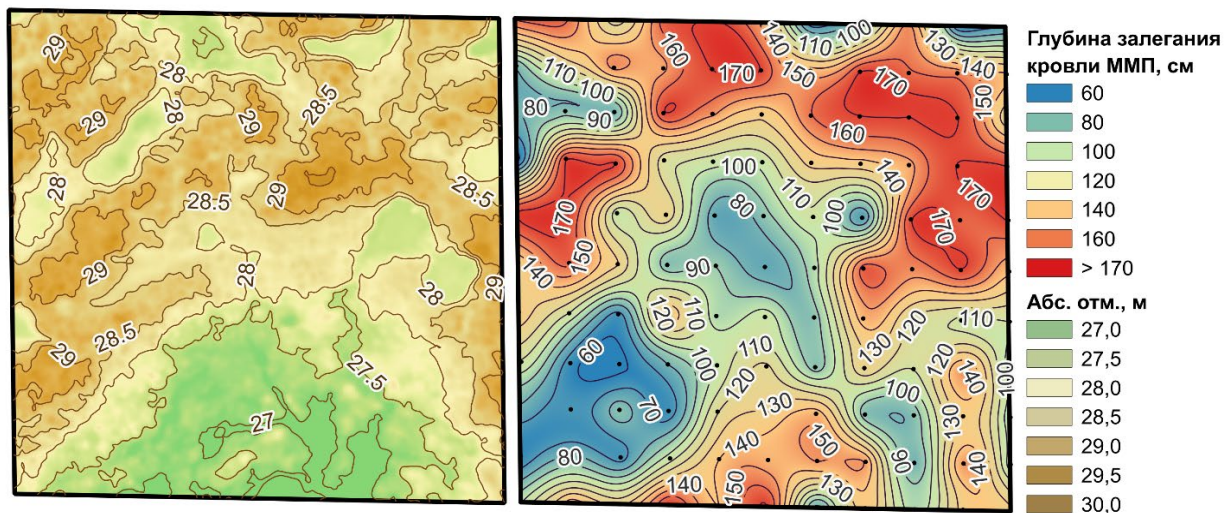


Рис. 3. Рельеф и глубина залегания кровли ММП на площадке CALM R40 на начало октября 2025.

Выполненные геофизические работы ЕМ34-3 показали различные свойства грунтов на разных диапазонах эффективной чувствительности. Поверхности бугров с наименьшей глубиной залегания кровли ММП соответствуют наиболее высоким значениям сопротивления (от 250 до 5000 Ом·м), что также может свидетельствовать о большой мощности сильнольдистых грунтов. Нижележащие слои характеризуются значением изучаемого параметра до 150 – 200 Ом·м, что свидетельствует о снижении льдистости с

глубиной (рис. 4). Участки мочажин отмечаются более низкими сопротивлениями на малых глубинах (от 125 до 200 Ом·м), и более высокими на большей глубине (175–250 Ом·м), что может свидетельствовать о наличии мерзлых грунтов под мочажинами. Глубина несквозного талика может составлять 4–6 м.

К таликовой зоне можно отнести участок поймы р. Малая Гравийка, где УЭС находится при всех разносах в диапазоне от 80 до 125 Ом·м. В январе 2025 была пробурена скважина, сложенная талыми супесями и суглинками твердой и полутвердой консистенций, где сопротивления на всех разносах и диполях составили от 90 до 125 Ом·м с температурой грунтов на глубине ниже деятельного слоя $+0.5^{\circ}\text{C}$. В целом, свойства мерзлых грунтов, при температурах, близких к 0°C , сходны с таковыми у талых пород. По данным А.Д. Фролова [1998], УЭС мерзлых супесей и суглинков с массивной криотекстурой при температуре от -0.5 до 0°C может составлять 30 – 60 Ом·м, со шпировой – 100 – 500 Ом·м, у песков с массивной криотекстурой – 50 – 100 Ом·м. Льды при данной температуре имеют УЭС 10 000 – 50 000 Ом·м. Поэтому наличие аномалий с высоким УЭС в тысячи Ом·м при данных высокотемпературных грунтовых условиях может свидетельствовать о наличии крупных залежей подземных льдов, которые для района исследования являются редкостью в силу значительной деградации ММП в голоцене.

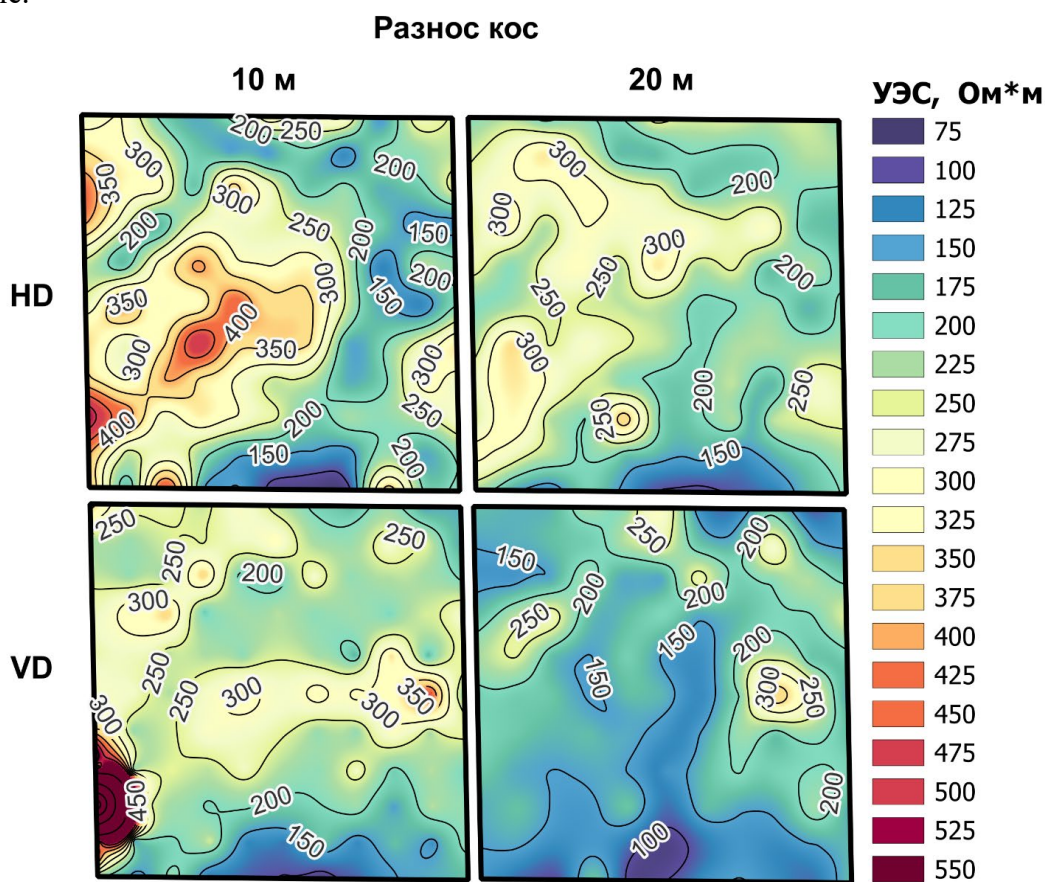


Рис. 4. Изолинии удельного электрического сопротивления (УЭС) на площадке CALM с разносом кос 10 и 20 м при горизонтальном (HD) и вертикальном (VD) диполях.

Ввиду того, что HD 10 м отражает близповерхностные условия, целесообразно оценить наличие связи между глубиной залегания кровли ММП и электропроводностью грунта. Корреляция составила 0.78, коэффициент детерминации 0.60 (рис. 5). Таким образом, можно говорить о достаточно высокой связи между параметрами массива грунта для участков, где таликовые зоны отсутствуют и под талым слоем располагаются льдистые грунты суглинистого и супесчаного состава, перекрытые торфом (как в пределах CALM R40). Из выборки исключены точки в пределах поймы, где значения электропроводности были значительно выше, чем на остальной площадке, что

свидетельствует о более низких сопротивлениях и говорит об иных геокриологических условиях. Данная закономерность может применяться на схожих участках с торфяниками для выявления особенностей геокриологического строения. Схожие площадные работы имеет смысл проводить и в других местах, характеризующихся изменением ландшафтных, геокриологических условий и дополнительно заверять наиболее контрастные участки более надежными методами, такими как электротомография.

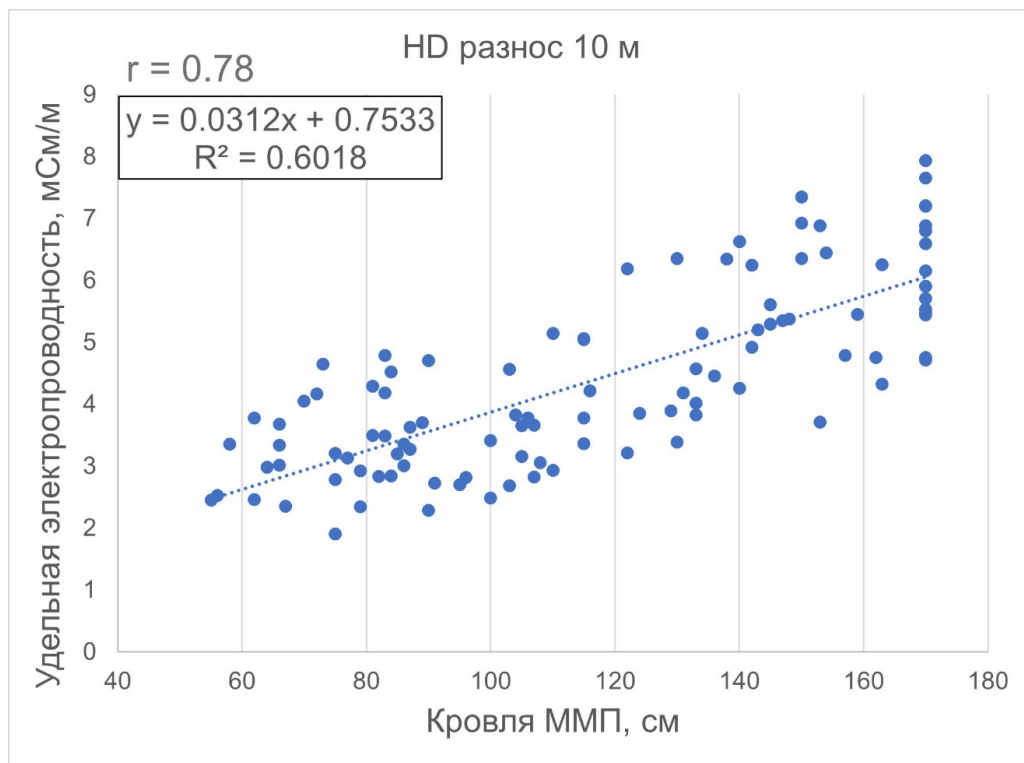


Рис. 5. Зависимость величины электропроводности массива грунта при разнесе косы 10 м и горизонтальном диполе (HD) от глубины залегания кровли ММП.

Заключение. Исследование положения кровли высокотемпературных многолетнемерзлых пород (ММП) и их геоэлектрических свойств в бассейне реки Малая Гравийка в районе города Игарка подтвердило значительную пространственную изменчивость геокриологических условий и продемонстрировало перспективность электромагнитных методов для оценки неоднородности мерзлых и сезонно-талых массивов грунтов в условиях климатических изменений.

На основе полевых исследований было установлено, что распределение участков с различной степенью деградации ММП характеризуется существенной пространственной изменчивостью. Наиболее высокие значения сезонного протаивания (до 170 см и более) обнаружены на севере и западе территории, тогда как наиболее стабильные участки бугров с глубиной залегания кровли 60 – 90 см расположены в восточной части, на площадке CALM R40.

Работы методом дипольного индуктивного профилирования (ДИП) позволили выявить геоэлектрические свойства грунтов. Высокое УЭС (до 5 000 Ом·м) характерно для поверхностей бугров, что свидетельствует о наличии сильнольдистых отложений. Наличие аномалий с высоким сопротивлением в тысячи Ом·м, вероятно, свидетельствует о сохранении остаточных масс подземных льдов, что является редкостью для данного района ввиду значительной деградации ММП в голоцене.

Корреляционный анализ выявил сильную прямую связь ($R = 0.78$) между удельной электропроводностью грунта и глубиной кровли ММП. Этот результат демонстрирует, что геоэлектрические измерения, отражающие влияние состава и льдистости пород, могут

быть эффективно использованы для оценки положения кровли ММП в пределах участков, где под сезонно-талым слоем располагаются льдистые грунты.

Полученные данные подтверждают перспективность использования ДИП как экспресс-метода для оперативной и бесконтактной оценки неоднородности геокриологических условий.

Рекомендации для дальнейших работ:

Для повышения достоверности и детализации геоэлектрических данных необходимо использовать более надежные методы, такие, как электротомография, особенно для верификации контрастных участков (аномалии высокого УЭС и таликовые зоны).

Выявленную корреляционную зависимость имеет смысл применять на схожих участках с торфяниками, что позволит выявить особенности геокриологических условий на других территориях.

Финансирование. Работа выполнена в рамках базового проекта «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика» (№ АААА-А20-120111690010-2). Авторы выражают благодарность сотрудникам Вилуйской научно-исследовательской мерзлотной станции и руководителю Великину С.А. за предоставленное оборудование, Пимову А.И. за помощь в организации полевых работ, Ефимову В.А. за помощь в проведении аэрофотосъемочных работ.

ЛИТЕРАТУРА

Лебедева Л.С., Бажин К.И., Христофоров И.И., Абрамов А.А., Павлова Н.А., Ефремов В.С., Огонеров В.В., Тарбеева А.М., Федоров М.П., Нестерова Н.В., Макарьева О.М. Надмерзлотные субаэральные талики в бассейне реки Шестаковка (Центральная Якутия) // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 1. С. 40-50. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2019-1(40-50)

Попов С.В., Кашкевич М.П., Романова Н.Е., Малышева А.М., Лебедева Л.С. Выявление субаэральные таликов геофизическими методами в средней части бассейна р. Лена, Центральная Якутия // Записки Горного института. 2025. Т. 274. С. 63-75.

Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пушино. ОНТИ ПНЦ РАН. 1998. 515 с.

McNeill J.D. Electromagnetic terrain conductivity measurements at low induction numbers: Geonics Ltd., Mississauga, Ontario, Canada, Technical Note TN-6. 1980. 15 p.

Rodionov A., Flessa H., Grabe M., Kazansky O.A., Shibistova O., Guggenberger G. Organic carbon and total nitrogen variability in permafrost-affected soils in a forest-tundra ecotone // European Journal of Soil Science. 2007. Vol. 58. Is. 6. P. 1260–1272. doi: 10.1111/j.1365-2389.2007.00919.x

Circumpolar Active Layer Monitoring Network (CALM): [сайт]. URL: <https://www2.gwu.edu/~calm/> (дата обращения: 23.11.2025).

POSITION OF THE HIGH-TEMPERATURE PERMAFROST TABLE AND ITS GEOELECTRICAL PROPERTIES (A CASE STUDY OF THE MALAYA GRAVIYKA RIVER BASIN, IGARKA REGION)

Andriushin D.S.¹, Razumovsky R.O.¹, Sidorova T.A.²

¹ Igarka Geocryological Laboratory, MPI SB RAS, Igarka, Russia

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The study investigates the position of the high-temperature permafrost table and the associated geoelectrical properties within the Malaya Graviyka River basin near Igarka, Russia. Field measurements were conducted using dipole inductive profiling (EM34-3) and probing to determine the depth of the permafrost table across various landscape types. Results indicate

significant spatial variability in permafrost degradation, with the northern and western parts of the study area exhibiting deeper active layers compared to more stable peat-mound complexes in the east. Correlation analysis revealed a strong relationship ($R = 0.78$) between soil electrical conductivity and permafrost table depth, reflecting the influence of soil composition and ice content. The presence of high-resistivity anomalies suggests relic massive ground ice bodies, rare in this region due to Holocene thawing. The findings highlight the potential of electromagnetic methods for mapping permafrost heterogeneity under warming climatic conditions.

Keywords: *permafrost, active layer, dipole electromagnetic profiling, permafrost degradation, geoelectrical properties*

REFERENCES:

- Lebedeva L.S., Bazhin K.I., Khristoforov I.I., Abramov A.A., Pavlova N.A., Efremov V.S., Ogonerov V.V., Tarbeeva A.M., Fedorov M.P., Nesterova N.V., Makarieva O.M.* Suprapermfrost subaerial taliks, Central Yakutia, Shestakovka river basin // *Earth's Cryosphere*. 2019. Vol. XXIII. № 1. P. 35-44. (in Russian). doi: 10.21782/KZ1560-7496-2019-1(40-50)
- Popov S.V., Kashkevich M.P., Romanova N.E., Malysheva A.M., Lebedeva L.S.* Identification of subaerial taliks by geophysical methods in the middle part of the Lena River basin, Central Yakutia // *Journal of Mining Institute*. 2025. Vol. 274. P. 63-75.
- Frolov A.D.* Electrical and Elastic Properties of Frozen Rocks and Ices. Pushchino: Pushchino Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 1998, 515 p. (in Russian).
- McNeill J.D.* Electromagnetic terrain conductivity measurements at low induction numbers: Geonics Ltd., Mississauga, Ontario, Canada, Technical Note TN-6. 1980. 15 p.
- Rodionov A., Flessa H., Grabe M., Kazansky O.A., Shibistova O., Guggenberger G.* Organic carbon and total nitrogen variability in permafrost-affected soils in a forest-tundra ecotone // *European Journal of Soil Science*. 2007. Vol. 58. Is. 6. P. 1260–1272. doi: 10.1111/j.1365-2389.2007.00919.x
- Circumpolar Active Layer Monitoring Network (CALM): [сайт]. URL: <https://www2.gwu.edu/~calm/> (дата обращения: 23.11.2025).