

**Научная статья**УДК 550.3; 551.345;  
551.321.8DOI: 10.24412/2658-4255-  
2024-4-37-50

EDN: RGTFFK

**Для цитирования:**

Попов С.В., Кашкевич М.П.,  
Боронина А.С. [и др.]  
Рекогносцировочные  
геофизические и  
гидрометеорологические  
исследования криолитозоны  
в районе города Салехард  
и на озере у ледника  
Райизский (Полярный Урал) //  
Российская Арктика. 2024.  
Т. 6. № 4. С. 37-50.  
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2024-4-37-50>

Получена: 12.08.2024  
Принята: 06.12.2024  
Опубликована: 16.12.2024

**For citation:**

Popov S.V., Kashkevich M.P.,  
Boronina A.S. [et al.]  
Reconnaissance geophysical  
and hydrometeorological  
studies of the cryolithozone in  
Salekhard city area and on the  
lake near the Rayizsky Glacier  
(Polar Urals). Russian Arctic,  
2024, vol. 6, no. 4, pp. 37-50.  
(In Russian).  
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2024-4-37-50>

**Конфликт интересов.**










Авторы заявляют об отсутствии  
конфликта интересов

**Финансирование.**

Работа выполнена при  
содействии Научного  
центра изучения Арктики  
и финансовой поддержке  
Департамента внешних  
связей ЯНАО при  
Правительстве ЯНАО.



## РЕКОГНОСЦИРОВОЧНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ И ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ В РАЙОНЕ ГОРОДА САЛЕХАРД И НА ОЗЕРЕ У ЛЕДНИКА РАЙИЗСКИЙ (ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)

С.В. Попов\*<sup>1,2,3</sup> , М.П. Кашкевич<sup>2</sup> , А.С. Боронина<sup>4,3</sup> ,  
С.Р. Шерстенникова<sup>2,3</sup> , З.А. Сайед<sup>2</sup> , А.С. Вичаре<sup>2</sup> ,  
М. Шаванди<sup>2</sup> , А.А. Башкова<sup>5,6</sup> , В.А. Паламарчук<sup>5</sup> 

<sup>1</sup> Полярная морская геологоразведочная экспедиция, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

<sup>4</sup> Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup> Научный центр изучения Арктики, г. Салехард, Россия

<sup>6</sup> Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН, г. Тюмень, Россия










E-mail: \*[spopov67@yandex.ru](mailto:spopov67@yandex.ru)

**Аннотация**

В последние годы в Арктике наблюдается ускоренное таяние мерзлоты и ледников, вызванное изменением климата, что оказывает влияние на ландшафты, растительность, животных и инфраструктуру. Поскольку 65% территории России покрыто мерзлотой, понимание её изменений имеет ключевое значение. В «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности до 2035 года» акцентируется внимание на термометрическом мониторинге, однако геофизические методы, такие как георадарное профилирование и вертикальные электрические зондирования, крайне важны для всестороннего исследования. В рамках исследования использовались георадарное профилирование, вертикальное электрическое зондирование и актинометрические измерения (интенсивность солнечной радиации и альbedo подстилающей поверхности). Результаты показали наличие таликов (незамерзающих участков), а также вариации удельного сопротивления в зависимости от состава почвы и уровня влажности. Также на основе полученных данных был рассчитан тепловой баланс. Его изменение в районе г. Салехард составило от -13 до 13 Вт/м<sup>2</sup>. На территории горного массива Рай-Из тепловой баланс почти на порядок меньше. Он варьирует в пределах от -2 до 2 Вт/м<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** Салехард, Полярный Урал, приледниковое озеро, многолетнемёрзлые породы, геофизика, талик, теплообмен, георадиолокация, вертикальное электрзондирование

## RECONNAISSANCE GEOPHYSICAL AND HYDROMETEOROLOGICAL STUDIES OF THE CRYOLITHOZONE IN SALEKHARD CITY AREA AND ON THE LAKE NEAR THE RAYIZSKY GLACIER (POLAR URALS)

S.V. Popov<sup>1,2,3</sup> , M.P. Kashkevich<sup>2</sup> , A.S. Boronina<sup>4,3</sup> ,  
S.R. Sherstennikova<sup>2,3</sup> , Z.A. Syed<sup>2</sup> , A.S. Vichare<sup>2</sup> ,  
M. Shavandi<sup>2</sup> , A.A. Bashkova<sup>5,6</sup> , V.A. Palamarchuk<sup>5</sup> 

<sup>1</sup> Polar Marine Geological Exploration Expedition, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> P.I. Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of

Sciences, Yakutsk, Russia

<sup>4</sup> State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

<sup>5</sup> Arctic Research Centre of the Yamal-Nenets autonomous district, Salekhard, Russia

<sup>6</sup> Institute of the Earth's Cryosphere of the Tyumen Scientific Center SB RAS, Tyumen, Russia

E-mail: [\\*spopov67@yandex.ru](mailto:*spopov67@yandex.ru)

### Abstract

In recent years, Arctic permafrost and glaciers have been thawing faster due to climate change, affecting landscapes, plants, animals, and infrastructure. Since 65% of Russia is covered by permafrost, understanding its changes is important. The "Strategy for the Development of the Arctic Zone of the Russian Federation and Ensuring National Security until 2035" emphasizes thermometric monitoring, but geophysical methods like GPR and electrical prospecting are vital for a comprehensive investigation. To address this, St. Petersburg State University has initiated a CORELIS master's program, aimed at training specialists in polar region studies using various methods. The program emphasizes English instruction to include international students and Russian students. We used GPR profiling, electrical sounding, and actionmetric measurements/albedo (intensity of solar radiation) to study the area. Preliminary results showed significant permafrost melting, and discovered taliks (unfrozen areas), with variations in resistivity correlating by soil composition and moisture levels. This provided important heat balance data for future permafrost studies under different climate conditions.

**Keywords:** Salekhard, Polar Ural, glacial lake, permafrost, geophysics, talik, heat transfer, GPR, vertical electrical sounding

---

### Введение

Климатические изменения, наблюдаемые в последние десятилетия и прогнозируемые в последующие годы [1, 2], наибольшее влияние оказывают на ледники и многолетнюю мерзлоту, которая ускоренными темпами начинает оттаивать в Арктике [3]. Уже сейчас это негативно сказывается на ландшафте, флоре и фауне, что, как следствие, пагубным образом отражается на инфраструктуре [4-6]. Кроме того, в процессе деградации многолетней мерзлоты выделяются парниковые газы, вследствие чего глобальное потепление также ускоряется [7]. Поскольку многолетняя мерзлота занимает примерно 65% территории нашей страны, то выяснение её изменений в случае реализации тех или иных климатических сценариев является крайне важной научной задачей, которая имеет вполне осязаемый экономический эффект. Понимание этого отражено в «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности до 2035 года», утверждённой Указом Президента РФ № 645 от 26.10.2020. Она, в частности, предполагает закладку многочисленных новых термометрических скважин для осуществления мониторинга верхней части геологического разреза [8-10], который также включает в себя и многолетнюю мерзлоту. Впоследствии эти данные могут быть использованы для моделирования протекания процессов теплопереноса и оценки того, что будет происходить в слое многолетней мерзлоты в будущем [11, 12]. Однако скважины термометрического мониторинга позволяют получить информацию лишь в пунктах, где они установлены. При этом для научных и особенно прикладных задач требуется выяснение мощности сезонно-талого слоя (СТС), а также глубины залегания таликов и оконтуривание их положения в плане, если они имеются. Оперативно на эти вопросы могут ответить лишь геофизические методы, наиболее эффективными среди которых являются *георадиолокация* и *электроразведка*.

Указанные задачи предстоит решать тем, кто сейчас обучается в институтах и университетах. Таким образом, перед высшим образованием встаёт вопрос о воспитании высокообразованных молодых специалистов, профессиональные навыки и знания которых связаны с изучением полярных регионов различными методами. В связи с этим в Институте наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета была создана магистерская программа «Комплексное изучение окружающей среды полярных регионов» (CORELIS – Cold Regions Environmental Landscapes Integrated Science). Её особенность заключается в том, что все предметы преподаются на английском языке, что позволяет проходить обучение и студентам из-за рубежа, не знающим русского языка. С другой стороны, российские студенты, обучающиеся на

этой программе, помимо прочего, получают навыки общения, публичных выступлений и подготовки работ на английском языке, что тоже крайне важно в научной среде.

Магистерская программа CORELIS, как и любая другая, реализуемая в Институте наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета, предполагает полевые студенческие практики, в ходе которых обучающиеся под руководством специалистов получают профессиональные навыки. В этом году такое обучение было организовано в районе города Салехард и на леднике Райизский на Полярном Урале (известный также как «ледник Романтиков») при содействии *Научного центра изучения Арктики* и финансировании *Департамента внешних связей ЯНАО* при *Правительстве ЯНАО*. Полевые работы выполнялись в период с 14-го по 22-е июля 2024 года и включали в себя георадарное профилирование, вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ), батиметрическую съёмку приледникового озера и актинометрические измерения. Схема расположения участков исследований показана на рис. 1. Цель работ заключалась в выяснении особенностей строения верхней части геологического разреза, определении мощности СТС, изучении озёра, примыкающего к леднику, а также в сборе актинометрических данных для верификации математической модели тепломассопереноса, разработанной и реализованной авторами в виде компьютерной программы<sup>1</sup>. На полученных материалах также базируется последующее математическое моделирование состояния многолетней мерзлоты и приледниковых озёр при различных климатических сценариях, разработанных Межправительственной группой экспертов по изменению климата (IPCC) [3]. Применительно к образовательному процессу решалась задача проведения полного цикла работ: сбор данных, их камеральная обработка, интерпретация и получение итогового научного результата.

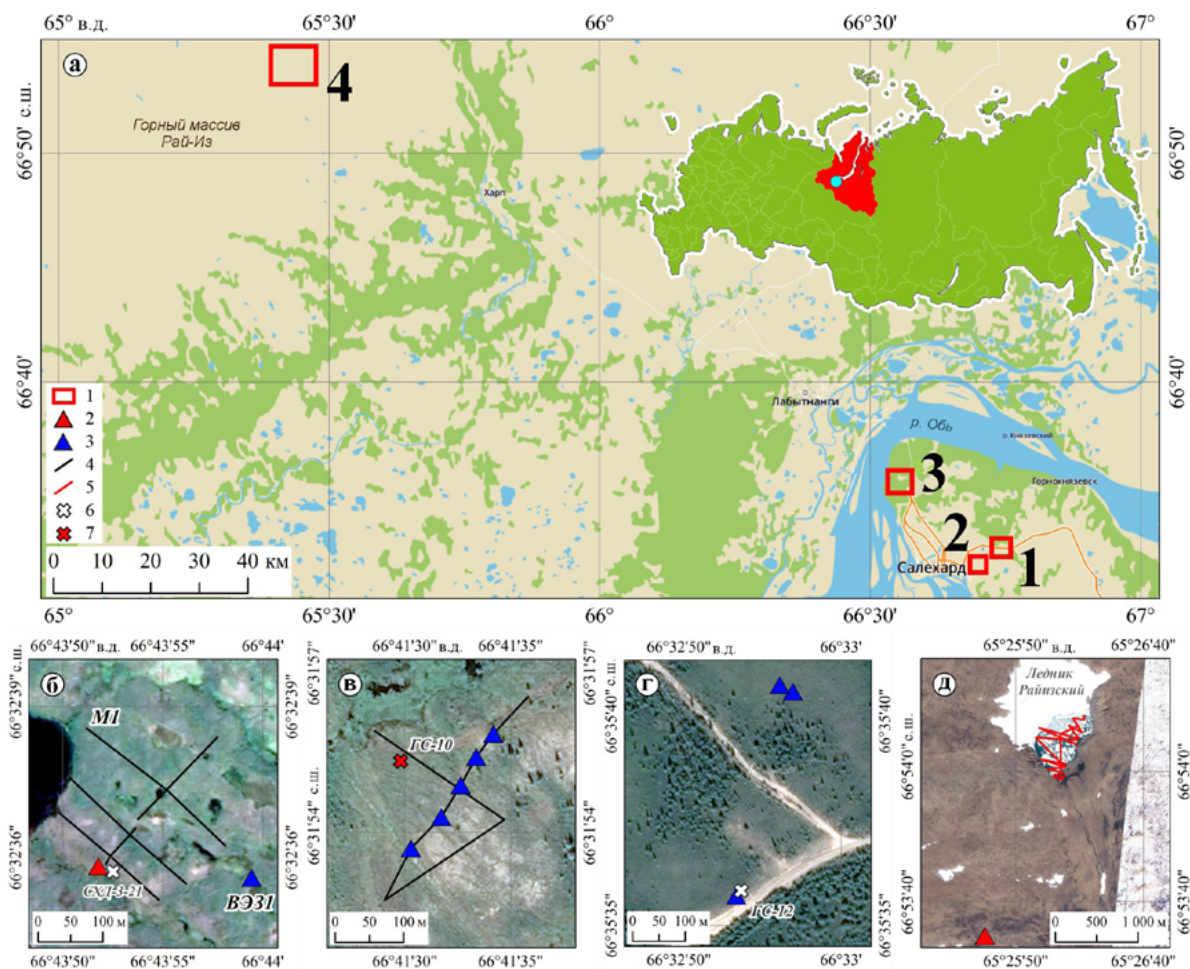


Рисунок 1. Схема расположения работ

1- районы работ; 2- пункты комплексных актинометрических и термометрических наблюдений; 3- пункты ВЭЗ; 4- профили георадарных исследований; 5- маршруты промеров глубин; 6- заложенные гидрогеологические скважины; 7- планируемые гидрогеологические скважины. Район работ №1 показан на секции а, №2 – на секции б, №3 – на секции в и №4 – на секции д

<sup>1</sup> Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS № 2023669994. Программа для моделирования процессов тепломассопереноса в многолетнемёрзлых породах (FrozenSoil) / Попов С.В., Боронина А.С., Лебедева Л.С. Заявка №2023669430. 2023. Бюл. №10.

Выбранный район работ идеально подходил для проведения практики студентов, изучающих полярные регионы. С одной стороны, он достаточно хорошо исследован: геолого-геофизические работы, а также изучение состояния многолетней мерзлоты [13] активно проводятся здесь со второй половины прошлого века. Последние десятилетия они характеризуются выраженной инженерной направленностью, связанной с развитием городской инфраструктуры и дорожного строительства [14, 15]. Однако, с другой стороны, как указывалось выше, в Арктической зоне ускоренными темпами происходит деградация многолетней мерзлоты. Но этот процесс крайне неравномерен. Таким образом, имеется обширный материал для сравнения результатов прошлых наблюдений с тем, что регистрируется в настоящее время. Это позволит сделать обоснованные выводы о характере протекания мерзлотных процессов, что крайне важно как с позиций фундаментальных научных исследований, так и в аспекте решения прикладных задач. Однако это следующий шаг в изучении района исследований и очередной этап в работе студентов СПбГУ программы CORELIS.

### Материалы и методы

Полевые работы выполнялись на четырёх участках: в непосредственной близости от скважины СХД-3-21 (район 1), планируемой скважины ГС-10 (район 2), недавно организованной скважины ГС-12 (район 3) и в районе ледника Райизский (район 4). В первом районе (рис. 16) изначально было выполнено георадарное профилирование. Исследования проводились отечественным георадаром ОКО-2 (ООО «Логис», Россия) с раздвижными антеннами АБ-150 (частота зондирующих импульсов 150 МГц) по стандартной методике [16]. Процесс выполнения работ показан на рис. 2а. Общая протяжённость маршрутов составила около 400 м. Применение одометра обеспечивало равномерность зондирований через каждые 10 см профиля. Прямолинейность маршрутов достигалась выставлением видимых ориентиров на местности. Плановая привязка осуществлялась по спутниковому приёмнику Garmin GPSMap64 (Garmin Ltd., США). Её точность оценивается в первые метры.



Рисунок 2. Процесс выполнения георадарных (а) и электроразведочных работ (б), актинометрический и термометрический комплекс (в), измерения глубин озера (г). Фотографии авторов, июль 2024 г.

На участке вблизи скважины СХД-3-21 было выполнено параметрическое вертикальное электрическое зондирование (рис. 2б). В исследованиях использовался комплект электроразведочной аппаратуры: генератор тока ASTRA (ООО «Северо-Запад», Россия), измеритель напряжения ERA-MAX (ООО «НПП ЭРА», Россия), четыре стальных электрода и катушки с проводами. Измерения проводились с использованием установки Шлюмберже (4-х электродная симметричная установка AMNB). Разносы питающей линии (AB/2) составляли 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 4; 6; 8; 10; 15; 20; 25; 35; 50 и 70 м. Использование таких разносов обеспечивало достаточно высокую детальность изучения верхней части разреза и зондирование до глубины около 20 м. Плановая привязка пункта зондирования осуществлялась с использованием приёмоиндикатора Garmin GPSMap64. Кроме того, рядом со скважиной СХД-3-21 в пункте с координатами 66°32'36" с.ш. и 66°43'52" в.д. был установлен комплекс актинометрической и метеорологической аппаратуры (рис. 2в). Наблюдения проводились с помощью термодатчиков IBS-TH1 (*Inkbird, China*) для определения температуры и влажности воздуха, температуры поверхности деятельного слоя и температуры на глубинах 0,05 м; 0,1 м; 0,15 м; 0,2 м. Также фиксировалась скорость ветра с помощью цифрового анемометра MS6652C (*Hong Kong, China*). Набор наблюдений за характеристиками солнечного излучения включал суммарную и отражённую солнечную радиацию. Измерения осуществлялись в период с 15.07.2024 15:30 по 18.07.2024 11:00 с помощью кремниевых пиранометров HOBO S-LIB-M003 (*Massachusetts, USA*). Их общая продолжительность составила 67,5 часов с интервалом регистрации данных 5 минут.

На втором участке (рис. 1в) также было выполнено георадарное профилирование и ВЭЗ. Общая протяжённость георадарных маршрутов составила 320 м. Длина профиля ВЭЗ, выполненного вдоль одного из георадарных маршрутов, составила около 100 м и включала в себя пять пунктов зондирований. Методика выполнения работ аналогична предыдущей [16].

На третьем участке (рис. 1г) также по аналогичной методике в районе скважины ГС-12 был отработан профиль ВЭЗ и один пункт ВЭЗ, расположенный недалеко от скважины.

На одном из снежников последнего района на территории горного массива Рай-Из (рис. 1д) в пункте с координатами 66°53'35" с.ш. и 65°25'38" в.д. был установлен тот же комплекс актинометрической и термометрической аппаратуры, что и в районе №1. Измерения осуществлялись в период с 19.07.2024 15:30 по 20.07.2024 15:00. Их общая продолжительность составила 23,5 часа с интервалом регистрации данных 5 минут. Озеро, расположенное у ледника Райизский (район 4), претерпевает изменения конфигурации и глубин в связи с отступлением ледника. Чтобы получить текущие геометрические параметры озера, была выполнена батиметрическая съёмка и определение контура береговой линии водоёма (рис. 1д). Промеры глубин осуществлялись с вёсельной лодки (Рис. 2г) при помощи электронного эхолота-картплоттера Garmin ECHOMAP 42cv (*Garmin Ltd., Taiwan*). Его технические характеристики (порог обнаружения глубин 0,3 м; максимальная фиксируемая глубина 690 м; точность позиционирования  $\pm 3$  м; рабочая частота излучателя 50/77/83/200 кГц и 260/455/800 кГц) обеспечили качественное решение задачи. Общая протяжённость промерных галсов составила около 2 км. Определение контура озера выполнялось с помощью спутникового приёмоиндикатора Garmin GPSMap64st. Точность плановой привязки составила первые метры.

Полученные геофизические данные обрабатывались по стандартной методике [16]. Для определения глубин залегания целевых границ по материалам георадарной съёмки применялись компьютерные программы Geoscan32 (ООО «Логис», Россия) и Prism2 (*Radar Systems, Inc, Latvia*). Данные ВЭЗ обрабатывались с помощью компьютерной программы ZondIP 1D (*Zond Software LTD, Cyprus*). Обработка актинометрических и температурных данных осуществлялась с помощью компьютерных программ, разработанных авторами.

### Результаты и обсуждение

В результате проведённых работ студентами было получено представление о строении верхней части геологического разреза по всем выполненным геофизическим маршрутам. Работы вблизи скважины СХД-3-21 носили опытно-методический характер и были связаны с оценкой возможности применения метода георадиолокации и метода вертикального электрического зондирования в подобных геолого-геоморфологических условиях, что крайне важно в плане обучения молодых специалистов. По данным бурения, выполненного до глубины 16 м, в верхней части отложения представлены сильнозоторфованным песком. Ниже по разрезу чередуются прослойки песка, суглинка и супеси. Мощность сезонно-талого слоя составляет около 50 см. Ниже, до забоя скважины, были вскрыты мёрзлые породы. Эта информация предоставлена Научным

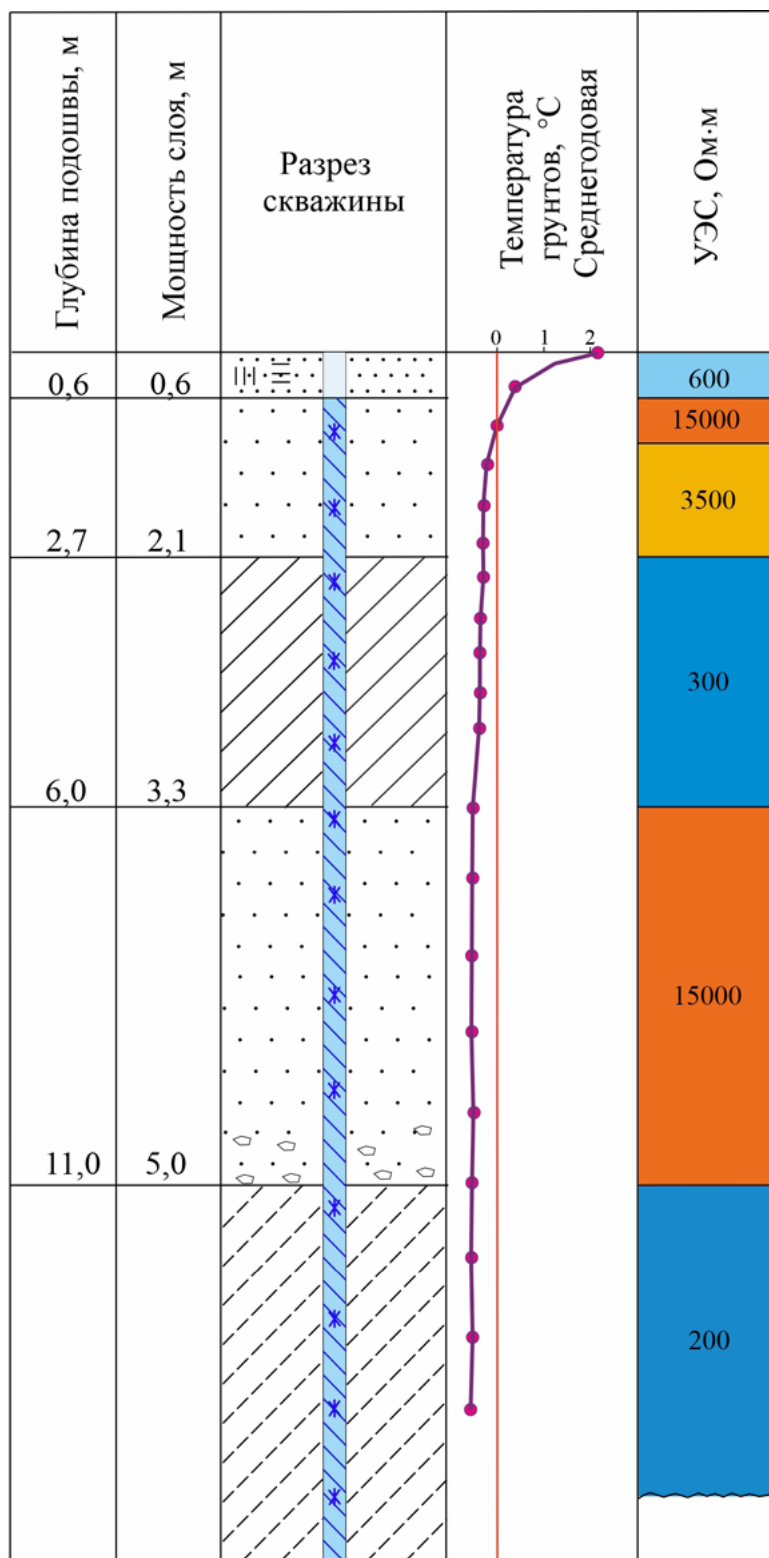
Центром изучения Арктики. Использование авторами металлического щупа на исследуемой территории показало, что глубина залегания кровли многолетнемерзлых пород варьирует преимущественно от 30 до 70 см, однако на отдельных участках щуп уходил более чем на 1 м. Подобное строение приповерхностной части геологического разреза представляется вполне подходящим для обоих указанных методов: для ВЭЗ в силу контрастности значений удельного электрического сопротивления и предположительно субгоризонтального залегания границ, а для георадиолокации – благодаря высокоомным слоям в верхней части разреза.

Наличие скважины и знание о литологическом составе верхней части геологического разреза позволило проинтерпретировать данные параметрического вертикального электрического зондирования. Его цель заключалась в определении удельного электрического сопротивления (УЭС) в слоях при известном положении границ. Полученные сведения могут быть впоследствии использованы при интерпретации кривых ВЭЗ пункта 1 на соседних участках в отсутствие скважин, обеспечивая тем самым минимальную эквивалентность при подборе геоэлектрического разреза. Пункт зондирования выбирался максимально близко к скважине, при этом учитывалась необходимость разноса питающей линии АВ/2 до 70 м, что обеспечивало глубину исследования до примерно 20 м.

Результаты обработки пункта ВЭЗ1 с использованием данных по скважине СХД-3-21 (рис. 3) позволили определить значения УЭС отложений, слагающих разрез. Данные ВЭЗ обрабатывались с помощью компьютерной программы ZondIP 1D (*Zond Software LTD, Cyprus*). Точность подбора (невязка между наблюдаемой и рассчитанной кривой) составила 5%. Верхний слой, представленный оттаявшим сильнозоторфованным обводнённым песком, характеризуется мощностью около 30 см и значениями УЭС 640 Ом·м. Второй слой (здесь и далее нумерация слоев дана сверху вниз), мощностью около 2 м, представлен мерзлыми песками и характеризуется типичными высокими значениями удельных сопротивлений от 3000 до 15000 Ом·м. Третий слой суглинков мощностью около 3,3 м демонстрирует понижение удельных сопротивлений до 300 Ом·м. Подобное значение представляется заниженным для мерзлых пород, однако, температурная кривая в скважине может свидетельствовать о наличии поровой воды в состоянии, близком к фазовому переходу, т.к. температуры не опускаются ниже  $-1^{\circ}\text{C}$ . Четвертый слой представлен мерзлыми песками с грубообломочным материалом мощностью около 5 м и сопротивлением около 15000 Ом·м. Нижний слой с сопротивлением 200 Ом·м, по данным скважины, ассоциируется с супесью. По-видимому, температура около  $-1^{\circ}\text{C}$  приводит к промерзанию песчаных отложений и, как следствие, повышению сопротивления на один – два порядка. Этой же температуры оказывается недостаточно для полного промерзания грунтов суглинистого состава и супесей, что приводит к незначительному увеличению сопротивления. При интерпретации данных ВЭЗ1 на участке ГС-10 при отсутствии заложения скважин учитывали сведения об удельных сопротивлениях пород, полученные вблизи скважины СХД-3-21.

Георадарная съёмка вблизи скважины СХД-3-21 выполнена на территории  $280 \times 260$  м по системе параллельных профилей и заверочного секущего маршрута. В качестве примера на рис. 4 показан временной георадарный разрез по профилю М1. Его местоположение приведено на рис. 16. На всех разрезах чётко выделяется граница 1 между напочвенным слоем, представленным мхом *Sphagnum palustre*, и сильно зоторфованным песком. Болотный мох характеризуется значительной влажностью, поэтому обычно его диэлектрическая проницаемость может варьировать в широких пределах: от 20 до 50 единиц. На участке работ мох повсеместно характеризовался высокой влагонасыщенностью, что позволило использовать значение диэлектрической проницаемости 50 единиц. В частности, в пункте мониторинга № 1 (рис. 1) был отобран мох *Sphagnum palustre*, и его влажность и плотность в результате собственных измерений составили 4490% и 393 кг/м<sup>3</sup> соответственно. Граница 1 регистрируется на задержках отражённого сигнала 5 – 7 нс. Это соответствует глубинам 10 – 23 см, что и наблюдалось *in situ* при зондировании металлическим щупом.

Ниже отражения 1 на задержках около 15 – 20 нс располагается интенсивная граница 2. Она ассоциируется с многолетнемерзлыми породами. Как указывалось выше, геологический разрез представлен песками различного гранулометрического состава. Таким образом, их диэлектрическая проницаемость в мерзлом и талом состоянии при значительной влажности может отличаться почти на четверть порядка [17]. Этим и объясняется контрастность границы 2. Если исходить из значений диэлектрической проницаемости талого сильно зоторфованного песка порядка 30 единиц [17], то расчётная глубина залегания границы многолетней мерзлоты составляет около полуметра, что и соответствует значениям, полученным при использовании щупа (см. выше).



## Условные обозначения

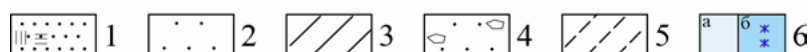


Рисунок 3. Литологическая колонка скважины СХД-3-21, температурная кривая, и геоэлектрический разрез по данным параметрического ВЭЗ:

1 – песок пылеватый сильноторфованный; 2 – песок мелкий, мёрзлый, слоистая и линзовато-плетенчатая криогенная текстура; 3 – суглинок легкий пылеватый серый, мёрзлый, шлиры от 0,5 до 7 см, линзовато-плетенчатая и массивная криогенная текстура; 4 – песок мелкий, серый, с прослоями ожелезнения, включения окатанного обломочного материала, массивная криогенная текстура; 5 – супесь серая, мёрзлая; 6: а – сезонно-талый слой, б – мёрзлые породы

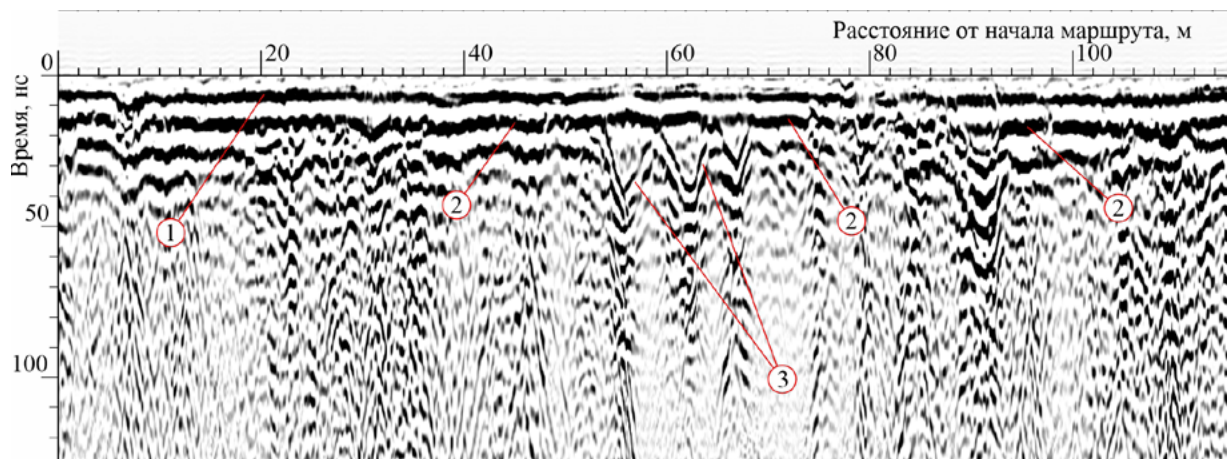


Рисунок 4. Временной георадарный разрез по профилю М1.  
 Отражения, ассоциируемые с:  
 1- границей между напочвенным слоем и грунтом;  
 2- границей между сезонно-талым слоем и многолетнемёрзлыми породами;  
 3- подошвой талика. Положение профиля М1 показано на рис. 16

На ряде маршрутов, включая представленный на рис. 4, имеются отражения 3, характерные для таликовых зон [18]. Аналогичное волновое поле наблюдалось авторами в ходе их работ в Якутии (не опубликовано). Мощность выявленного талика оценивается примерно в один метр при ширине зоны около 15 м.

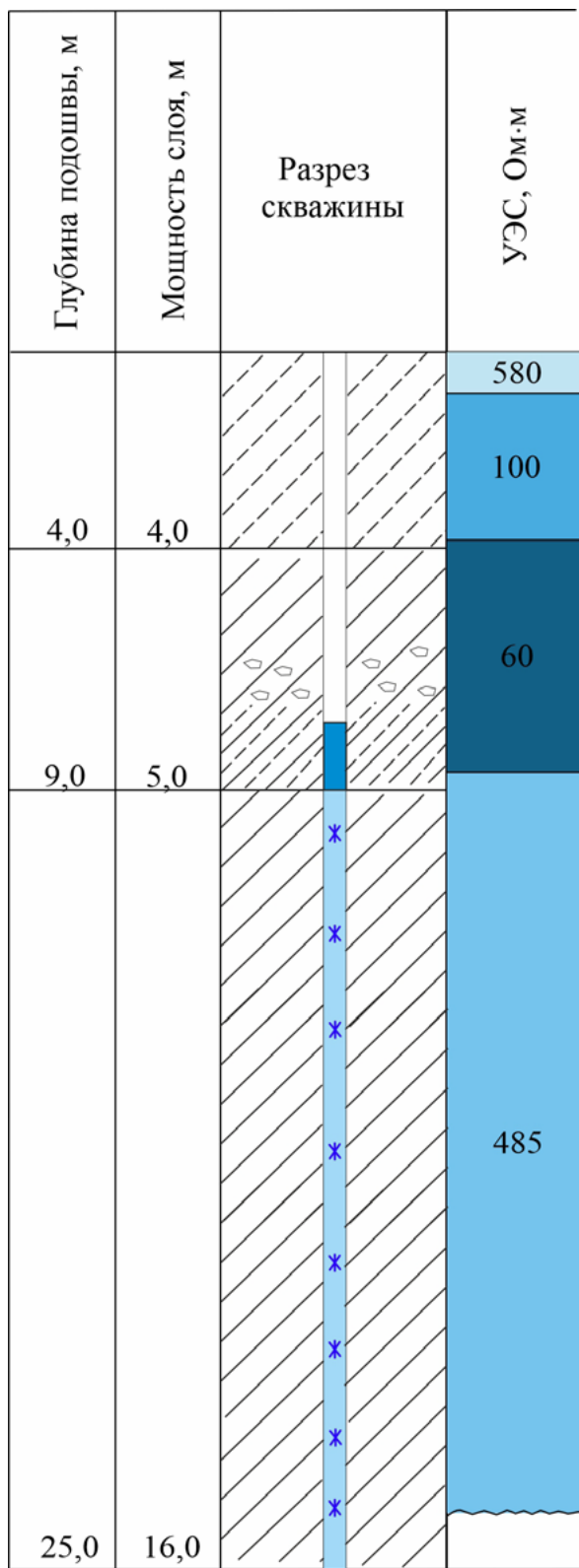
Работы вблизи скважины ГС-10 (район №2, рис. 1в) включали георадиолокационное профилирование по трём маршрутам общей протяженностью около 320 м и вертикальные электрические зондирования вдоль одного из профилей георадарной съёмки. Всего было выполнено 5 ВЭЗ с интервалом между пунктами зондирования 20 м. В ходе обработки и построения геоэлектрического разреза были использованы данные об удельных сопротивлениях, полученные с помощью параметрического ВЭЗ вблизи скважины СХД-3-21, а также архивные данные по скважине 31-Г.

Полученный в результате обработки разрез УЭС оказался схож с разрезом вблизи скважины СХД-3-21, о чем свидетельствует и похожий тип кривых ВЭЗ. Однако на участке вблизи проектируемой скважины ГС-10 удельные сопротивления в целом ниже, что может быть связано с большей обводненностью пород, а также присутствием значительного количества глинистого материала или тонких прослоев глин. Верхний сезонно-талый слой имеет схожую мощность от 60 до 80 см и удельные сопротивления от 100 до 300 Ом·м. Мёрзлые породы, расположенные ниже по разрезу, демонстрируют удельные сопротивления, превышающие на порядок значения для вышележащих сезонно-талых пород. Далее, до глубины исследования, которая составляет около 20 м, наблюдаются переслаивание пород относительно низкого (70 – 200 Ом·м) и высокого (от 800 – 2000 Ом·м) удельного сопротивления. Слоям с низкими его значениями предположительно соответствуют пески с прослоями глин и суглинки, а с высоким – пески с включениями крупнообломочного материала.

В северной части профиля ВЭЗ наблюдается повышение УЭС в верхней части разреза, что, вероятно, объясняется сменой состава грунтов и уменьшением глинистой составляющей в них. Благодаря этому на временном георадарном разрезе наблюдаются литологические границы, расположенные на глубинах 3-5 м. В остальной части профиля имеется лишь граница сезонно-талых и мёрзлых пород, а также литологическая граница на глубине около 70-100 см. Ниже из-за экранирующего влияния проводящих суглинков и глин электромагнитные волны затухают и не формируют отражений достаточной амплитуды. В центральной части разреза имеется небольшая таликовая зона, где кровля многолетнемёрзлых пород опускается до отметки 1 м.

Принципиально другой геоэлектрический разрез получен на Ангальском мысу вблизи скважины ГС-12 (рис. 1г), пробуренной в июле 2024 г. Литологическая колонка скважины ГС-12 и подобранный геоэлектрический разрез представлены на рис. 5.





Условные обозначения



Рисунок 5. Литологическая колонка скважины СГ-12 и геоэлектрический разрез по данным параметрического ВЭЗ: 1 – супесь коричневая, пластичная, легкая, с прослоями ожелезненного суглинка; 2 – суглинок легкий, коричневый, с включениями гальки; 3 – супесь, с 8 м - сильно обводненная; 4 - суглинок легкий темно-серый, мёрзлый, с включениями льда до 2 мм; 5: а – сезонно-талый слой, б – обводненные породы, в – мёрзлые породы

Верхний слой представлен супесью с характерными сопротивлениями для сухой породы около 580 Ом·м и для влажной породы около 100 Ом·м. Далее вниз по разрезу следует слой суглинков и слой обводненной супеси (по значениям значения УЭС объединяется в один с сопротивлением 60 Ом·м). В отличие от предыдущих участков, где развит торф и болотная растительность, которые препятствуют прогреву пород в летний период, на данном участке слой сезонного оттаивания гораздо более мощный. По данным бурения, мёрзлые породы вскрыты на глубине 9 м. Примерно на этой же глубине, по данным ВЭС, фиксируется кровля слоя, где сопротивления возрастают почти на порядок по сравнению с вышележащим.

Исследования, проводимые на территории горного массива Рай-Из, включали в себя батиметрические измерения. По результатам промеров глубин приледникового озера установлено, что его средняя глубина составляет около 20,5 м при максимальной глубине 65,6 м. Область наибольших глубин примыкает непосредственно к леднику.

На основе проведённых актинометрических и метеорологических измерений рассчитан тепловой баланс исследуемых поверхностей: сфагновый мох и снежник. Его уравнением является алгебраическая сумма всех потоков тепла, которые могут быть положительными и отрицательными, и дающая результирующий приток или отток энергии, который отвечает за нагрев или охлаждение поверхности. Уравнение теплового баланса имеет следующий вид:

$$A = Q(1 - \alpha) + I + P + V + L,$$

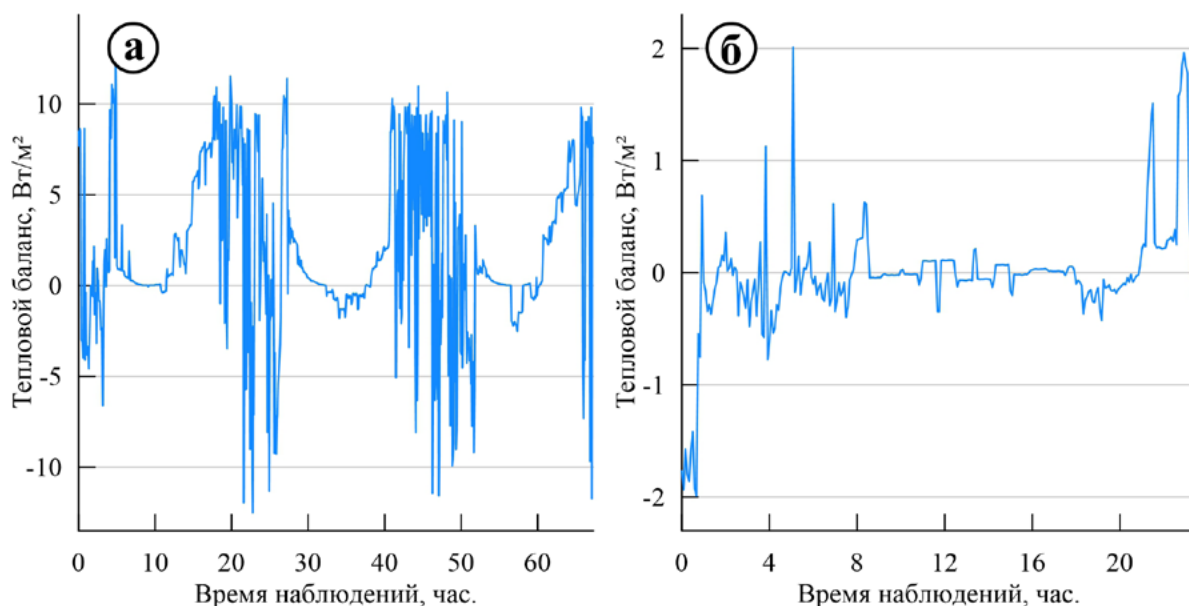
где  $Q$  – поток приходящей солнечной радиации,  $\alpha$  – альbedo подстилающей поверхности,  $I$  – длинноволновый баланс или эффективное излучение,  $P$  – поток тепла в почве,  $V$  – затраты тепла на испарение с деятельной поверхности или его выделение при конденсации водяного пара на этой поверхности,  $L$  – турбулентный поток тепла в приземном слое атмосферы [19]. Каждый из элементов теплового баланса рассчитывался на основе измеренных метеопараметров.

Тепловой баланс используется для изучения энергетического баланса системы. То есть значение суммы его слагаемых свидетельствует о нагреве или охлаждении. Познание закономерностей его распределения исключительно важно, поскольку под влиянием остаточной радиации формируется температурный режим подстилающей поверхности и тропосферы и в целом климат Земли. Несмотря на то, что наблюдения охватывали короткий промежуток времени, на основе полученных результатов сделаны предварительные выводы о тепловом и радиационном режиме изучаемых территорий. Для этого были построены графики хода значений теплового баланса. Они показаны на рис. 6. Из графиков следует, что в районе г. Салехард тепловой баланс изменяется в пределах от -13 до 13 Вт/м<sup>2</sup>. На территории горного массива Рай-Из он почти на порядок меньше. Тепловой баланс варьирует в пределах от -2 до 2 Вт/м<sup>2</sup>.

Над первым пунктом наблюдений (рис. 16) с координатами 66°32'36" с.ш. и 66°43'52" в.д. наблюдались значительные флуктуации, и значения баланса в дневные часы достаточно велики, что свидетельствует о нагреве деятельного слоя в течение всего срока измерений, включая ночные часы. Над вторым пунктом измерений (рис. 16) с координатами 66°53'35" с.ш. и 65°25'38" в.д. тепловой баланс мало отличен от нуля на протяжении всего периода наблюдений, что свидетельствует об отсутствии значительных потоков или оттоков тепла. Различия в получившихся результатах можно объяснить следующим образом: снежник на Полярном Урале имеет высокое альbedo, значительно больше, чем мох в пригороде Салехарда. Большая часть солнечной радиации отражается от снега обратно в атмосферу, не превращаясь в тепло, которое поглощается подстилающей поверхностью. Альbedo мха значительно ниже, и больше солнечной энергии поглощается, увеличивая приходную часть теплового баланса. Грунт и мох имеют более высокую теплоёмкость, чем снег. Они накапливают больше тепла днём и медленнее отдают его ночью, в результате чего суточные колебания температуры меньше, чем над снежником. Снег обладает низкой теплоёмкостью и быстро нагревается, и остывает. Несмотря на то, что первый исследуемый пункт находится на удалении от города, все равно значительный источник тепла – это антропогенная деятельность (транспорт, промышленные объекты). Над снежником на Полярном Урале такого вклада нет.

Также выполнялись теплофизические исследования напочвенного покрова на местах проведения метеорологических наблюдений. На месте мониторинга над первым пунктом был отобран мох *Sphagnum palustre*, и его влажность и плотность в результате измерений составили 4490% и 392,97 кг/м<sup>3</sup> соответственно. В других

опубликованных исследованиях влажность и плотность мха изменяется от 1440 % до 9820 % и от 50 до 273 кг/м<sup>3</sup> соответственно [20, 21]. Полученная нами плотность превышает значения из литературных источников, что может быть объяснено отличающимися условиями произрастания мха на Ямале.



*Рисунок 6. Тепловой баланс изучаемых территорий.  
а- тепловой баланс на пункте наблюдения, расположенного  
в пределах города Салехард;  
б- тепловой баланс на пункте наблюдения, расположенного  
на территории горного массива Рай-Из*

### **Заключение**

Геофизические исследования соответствуют данным по имеющимся скважинам. В частности, они показали, что многолетнемерзлые породы залегают крайне неглубоко, в пределах первого метра от поверхности. В этом смысле они сильно отличаются от того, что авторы наблюдали и изучали ранее: районы Якутии и Антарктиды [11, 12]. Научный интерес представляют выявленные по георадарным данным фрагменты таликов. Это несколько неожиданно для такого района, поскольку, как показывает моделирование авторов, талики обычно не развиваются при наличии мощного слоя мха [11]. Планируемое математическое моделирование покажет, при каких условиях они формируются. Данных для этого собрано достаточно. При последующем проведении работ целесообразно сгустить сеть и расширить территорию исследований. Кроме того, целесообразно осуществить их в холодное время года, чтобы документально подтвердить, что зарегистрированный объект является именно таликом, а не сходной по отражению в электромагнитном поле структурой.

Полученные результаты расчёта теплового баланса достаточно показательны и соответствуют наблюдаемым погодным условиям. Однако актинометрические и метеорологические наблюдения были проведены главным образом для верификации существующей модели тепломассопереноса и дальнейшего сценарного моделирования.

В ходе студенческой учебной практики был проведён обширный комплекс мультидисциплинарных работ, результаты которых, особенно в части актинометрии, после камеральной обработки будут положены в основу математического моделирования процессов, связанных с деградацией многолетней мерзлоты в районе города Салехард.

**Благодарности.** Работа выполнена при содействии *Научного центра изучения Арктики* и финансовой поддержке *Департамента внешних связей ЯНАО* при *Правительстве ЯНАО*. Авторы выражают признательность *Лебедевой Л.С. (Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН)* за предоставление актинометрической аппаратуры.

**Список литературы:**

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме // СПб.: Научно-технологические технологии. 2022. 124 с.
2. Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J. et al. Permafrost is warming at a global scale // Nature Communications. 2019. № 10. DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4
3. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. P. 35-115, DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
4. Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В. и др. Снижение устойчивости инфраструктуры ТЭК России в Арктике как следствие повышения среднегодовой температуры приповерхностного слоя криолитозоны // Вестник РАН. 2022. № 4. Т. 92. С. 303-314. DOI: 10.31857/S0869587322040053
5. Costard F., Gautier E., Brunstein D., Hammadi J., Fedorov A., Yang D., Dupeyrat L. Impact of the global warming on the fluvial thermal erosion over the Lena River in Central Siberia // Geophysical Research Letters. 2007. № 14. Vol. 34. DOI: 10.1029/2007GL030212
6. Kizyakov A.I., Wetterich S., Günther F. et al. Landforms and degradation pattern of the Batagay thaw slump, Northeastern Siberia // Geomorphology. 2022. Vol. 420. P. 108501. DOI: 10.1016/j.geomorph.2022.108501
7. Li W., Yan D., Weng B., Zhu L. Research progress on hydrological effects of permafrost degradation in the Northern Hemisphere // Geoderma. 2023. Vol. 438. P. 116629. DOI: 10.1016/j.geoderma.116629
8. Брушков А.В. Проблемы создания системы государственного мониторинга вечной мерзлоты // Фундаменты. 2022. № 3 (9). С. 4-9.
9. Konstantinov P., Zhelezniak M., Basharin N., Misailov I., Andreeva V. Establishment of permafrost thermal monitoring sites in East Siberia // Land. 2020. № 12. Vol. 9. P. 476.
10. Potapov A.I., Shikhov A.I., Dunaeva E.N. Geotechnical monitoring of frozen soils: Problems and possible solutions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2021. № 1. Vol. 1064. P. 012038.
11. Popov S.V., Boronina A.S., Nemchinova A.V., Lebedeva L.S., Biryukov A.S. Formation of subaerial taliks in Larsemann hills, Princess Elizabeth Land, East Antarctica // Polar Science. 2024. Vol. 40. P. 101070. DOI: 10.1016/j.polar.2024.101070
12. Попов С.В., Боронина А.С., Лебедева Л.С. Основные факторы формирования субаэральных таликов в рамках одномерной математической модели на примере реки Шестаковка, Центральная Якутия // Лёд и Снег. 2023. № 4. Т. 63. С. 597-611. DOI: 10.31857/S2076673423040130
13. Шеин А.Н., Краев Г.Н., Камнев Я.К. Геофизические исследования при организации и обслуживании региональной сети мониторинга мерзлоты в ЯНАО // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. № 1. Т. 2. С. 321-327.
14. Громадский А.Н., Арефьев С. В., Волков Н. Г. и др. Дистанционный контроль за температурным режимом вечномерзлых грунтов под зданиями г. Салехард // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2019. № 3 (104). С. 17-21. DOI: 10.26110/ARCTIC.2019.104.3.003
15. Охлопкова Т.В., Гурьянов Г.Р., Плотников А.А. Строительство и проектирование зданий и сооружений в условиях вечной мерзлоты // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4 (51). С. 184.
16. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию: Учебное пособие. М.: Издательство МГУ, 2004. 153 с.
17. Финкельштейн М.И., Мендельсон В.Л., Кутев В.А. Радиолокация слоистых земных покровов. Москва: Изд-во Советское Радио, 1977. С. 174.
18. Лебедева Л.С., Бажин К.И., Христофоров И.И. и др. Надмерзлотные субаэральные талики в бассейне реки Шестаковка (Центральная Якутия) // Криосфера Земли. 2019. № 1. Т. XXIII. С. 40-50. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-1(40-50)
19. Прохорова У.В., Терехов А.В., Иванов Б.В., Веркулич С.Р. Расчет составляющих теплового баланса ледника Альдегонда (Западный Шпицберген) в период абляции по данным наблюдений 2019 года // Криосфера Земли. 2021. № 3. Т. 25. С. 50-60. DOI: 10.15372/KZ20210305
20. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 1998. 279 с.
21. Гаврильев Р.И., Елисеев С.В. Теплофизические свойства мха и торфа // Методы определения тепловых свойств горных пород. Москва: Наука, 1970. С. 139-153.

**References:**

1. Tretij ocenochnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii. [The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation.]. General summary, St. Petersburg: Science-intensive technologies, 2022, 124 p. (In Russian).
2. Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J. [et al.] Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*, 2019, vol. 10. DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4.
3. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
4. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brushkov A.V. [et al.] Snizhenie ustojchivosti infrastruktury TEK Rossii v Arktike kak sledstvie povysheniya srednegodovoj temperatury pripoverhnostnogo sloya kriolitozony [Reduced stability of the Russian fuel and energy complex infrastructure in the Arctic as a consequence of an increase in the average annual temperature of the surface layer of the permafrost zone]. *Vestnik RAN – Bulletin RAS*, 2022, vol. 92, no. 4, pp. 303-314. (In Russian). DOI: 10.31857/S0869587322040053
5. Costard F., Gautier E., Brunstein D., Hammadi J., Fedorov A., Yang D., Dupeyrat L. Impact of the global warming on the fluvial thermal erosion over the Lena River in Central Siberia. *Geophysical Research Letters*, 2007, vol. 34, no. 14. DOI: 10.1029/2007GL030212
6. Kizyakov A.I., Wetterich S., Günther F. et al. Landforms and degradation pattern of the Batagay thaw slump, Northeastern Siberia. *Geomorphology*, 2022, vol. 420, pp. 108501. DOI: 10.1016/j.geomorph.2022.108501
7. Li W., Yan D., Weng B., Zhu L. Research progress on hydrological effects of permafrost degradation in the Northern Hemisphere. *Geoderma*, 2023, vol. 438, pp. 116629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.116629>
8. Brushkov A.V. Problemy sozdaniya sistemy gosudarstvennogo monitoringa vechnoj merzloty [Problems of creating a system of state monitoring of permafrost]. *Fundamenty [Fundamentals]*, 2022, no. 3 (9), pp. 4-9. (In Russian).
9. Konstantinov P., Zhelezniak M., Basharin N., Misailov I., Andreeva V. Establishment of permafrost thermal monitoring sites in East Siberia. *Land*, 2020, vol. 9, no. 12, pp. 476.
10. Potapov A.I., Shikhov A.I., Dunaeva E.N. Geotechnical monitoring of frozen soils: Problems and possible solutions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021, vol. 1064, no. 1, pp. 012038.
11. Popov S.V., Boronina A.S., Nemchinova A.V., Lebedeva L.S., Biryukov A.S. Formation of subaerial taliks in Larsemann hills, Princess Elizabeth Land, East Antarctica. *Polar Science*, 2024, vol. 40, pp. 101070. DOI: 10.1016/j.polar.2024.101070
12. Popov S.V., Boronina A.S., Lebedeva L.S. Osnovnye faktory formirovaniya subaeral'nyh talikov v ramkah odnomernej matematicheskoy modeli na primere reki Shestakovka, Central'naya Yakutiya [The main factors in the formation of subaerial taliks on the example of the Shestakovka River basin (Central Yakutia), using a one-dimensional mathematical model]. *Led i Sneg. [Ice and Snow]*, 2023, vol. 63 (4), pp. 597-611. (In Russian). DOI: 10.31857/S2076673423040130
13. Shein A.N., Kraev G.N., Kamnev Y.K. Geofizicheskie issledovaniya pri organizacii i obsluzhivanii regional'noj seti monitoringa merzloty v YANAO [Geophysical research in the organization and maintenance of a regional permafrost monitoring network in the Yamal-Nenets Autonomous Okrug]. *Interexpo Geo-Sibir [Interexpo Geo-Siberia]*, 2022, vol. 2, no. 1, pp. 321-327. (In Russian).
14. Gromadsky A.N., Arefiev S.V., Volkov N.G., et al. Distancionnyj kontrol' za temperaturnym rezhimom vechnomerzlyh gruntov pod zdaniyami g. Salekhard [Remote monitoring of the temperature regime of permafrost soils under buildings in Salekhard]. *Nauchnyj vestnik Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga – Scientific Bulletin of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug*, 2019, no. 3(104), pp. 17-21. (In Russian). DOI: 10.26110/ARCTIC.2019.104.3.003
15. Okhlopko T.V., Guryanov G.R., Plotnikov A.A. Stroitel'stvo i proektirovanie zdaniy i sooruzhenij v usloviyah vechnoj merzloty [Construction and design of buildings and structures in permafrost]. *Inzhenernyj vestnik Dona – Engineering Bulletin of the Don*, 2018, no. 4 (51), pp. 184. (In Russian).
16. Vladov M.L., Starovoytov A.V. Vvedeniye v georadiolokatsiyu. Uchebnoye posobiye [Introduction to ground penetrating radar. Study guide]. Moscow, MGU Publishing house, 2004, 153 p. (In Russian).
17. Finkelshtein M.I., Mendelson V.L., Kutev V.A. Radiolokaciya sloistyh zemnyh pokrovov

- [Radar of layered earth covers]. Moscow, Publishing house Sovetskoe Radio, 1977, 174 p. (In Russian).
18. Lebedeva L.S., Bazhin K.I., Khristoforov I.I. [et al.] Nadmerzlotnye subaeral'nye taliki v bassejne reki Shestakovka (Central'naya Yakutiya) [Suprapermafrost subaerial taliks in the Shestakovka River basin (Central Yakutia)]. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2019, vol. XXIII, no. 1, pp. 40-50. (In Russian). DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-1(40-50)
  19. Prokhorova U.V., Terekhov A.V., Ivanov B.V., Verkulich S.R. Raschet sostavlyayushchih teplovogo balansa lednika Al'degonda (Zapadnyj SHpicbergen) v period ablyacii po dannym nablyudenij 2019 goda [Calculation of the components of the heat balance of the Aldegonda glacier (Western Spitsbergen) during the ablation period based on observational data in 2019]. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2021, vol. 25, no. 3, pp. 50-60. (In Russian). DOI: 10.15372/KZ20210305
  20. Gavrilyev R.I. Teplofizicheskie svojstva gornyh porod i napochvennyh pokrovov kriolitozony. [Thermophysical properties of rocks and ground covers of the permafrost zone]. Novosibirsk, Publishing house SB RAS, 1998, 279 p. (In Russian).
  21. Gavrilyev R.I., Eliseev S.V. Teplofizicheskie svojstva mha i torfa. [Thermophysical properties of moss and peat]. Metody opredeleniya teplovyh svojstv gornyh porod [Methods for determining the thermal properties of rocks]. Moscow, Publishing house Science, 1970, pp. 139-153. (In Russian).