

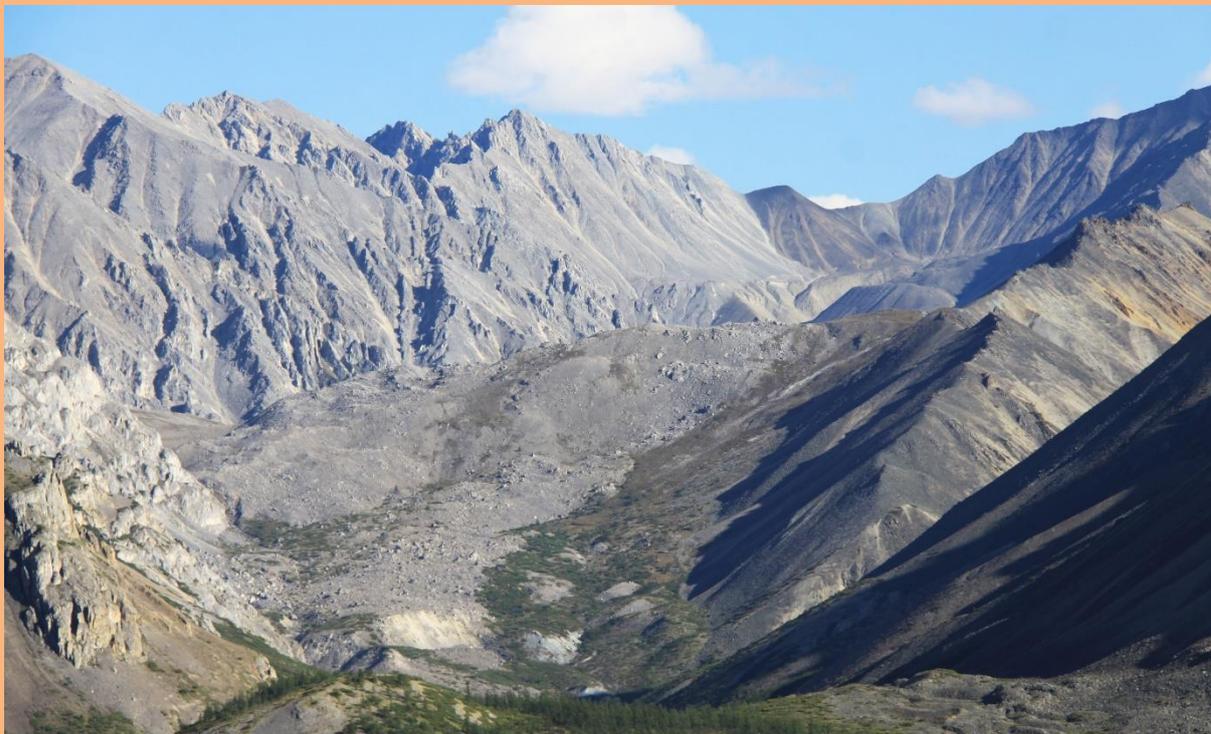
**СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ АЛМАЗА И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ СО РАН
АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
СЕВЕРО-ВОСТОЧНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.К. АММОСОВА**



**ГЕОЛОГИЯ И МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВЫЕ РЕСУРСЫ
СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ 2024**

**Материалы XIV Международной научно-практической конференции,
посвященной 300-летию Российской академии наук
и 100-летию золотодобывающей промышленности Республики Саха (Якутия)**

г. Якутск, 26 – 29 марта 2024 г.



Новосибирск, 2024

Самостоятельное электронное издание
УДК 55(063) (571.56)
ББК 26.3Я43 (2 Рос. Яку)

Ответственный редактор
член-корреспондент РАН
В.Ю. Фридовский

Редакционная коллегия:
Я.Б. Легостаева, Л.И. Полуфунтикова, О.Б. Олейников, А.В. Прокопьев

Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России 2024: материалы XIV Международной научно-практической конференции, посвященной 300-летию Российской академии наук и 100-летию золотодобывающей промышленности Республики Саха (Якутия), г. Якутск, 26-29 марта 2024 г. [Электронный ресурс] / [отв. ред. В.Ю. Фридовский], редкол. Я.Б. Легостаева и [др.]; Сиб. отд-ние РАН [и др.] – Новосибирск: СО РАН, 2024. – 1 опт. компакт-диск (CD-ROM).

ISBN 978-5-6049901-0-0

В сборнике представлены труды XIV Международной научно-практической конференции, посвященной геологии и минерально-сырьевым ресурсам Северо-Востока России. Изложены результаты изучения тектоники, геодинамики, эволюции литосферы и магматизма, геологии, минералогии и рудообразующих систем месторождений полезных ископаемых СВ Азии. Приведены новые сведения по гидрогеологии, геоэкологии, мерзлотоведению. Материалы сборника предназначены для научных работников и специалистов, а также студентов, обучающихся по геологическим специальностям.

УДК 55(063) (571.56)
ББК 26.3Я43 (2 Рос. Яку)

На обложке: Крупнейшая на СВ Азии сейсмогенная плотина. Среднее течение р. Тирехтях (левый приток р. Момы), осевая часть хребта Улахан-Чистай; август 2023.

ISBN 978-5-6049901-0-0

© ИГАБМ СО РАН, 2024
© СВФУ, 2024

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ ПО ИЗУЧЕНИЮ СУБАЭРАЛЬНЫХ НАДМЕРЗЛОТНЫХ ТАЛИКОВ РАЙОНА РЕКИ ШЕСТАКОВКА, ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЯКУТИЯ

Сергей Попов^{1,2}, Марина Кашкевич¹, Наталья Романова³, Алиса Малышева¹, Людмила Лебедева^{2,1}

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»
199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7/9

² ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
677010, Россия, г. Якутск, Мерзлотная, 36

³ ООО «ГеофизПоиск», 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 26 линия, 15, корп. 2, лит. А

RESULTS OF GEOPHYSICAL INVESTIGATIONS TO STUDY SUBAERIAL SUPRA PERMAFROST TALIKS IN THE AREA OF THE SHESTAKOVKA RIVER, CENTRAL YAKUTIA

Sergey Popov^{1,2}, Marina Kashkevich¹, Natalia Romanova³, Alisa Malysheva¹, Liudmila Lebedeva^{2,1}

¹ Saint-Petersburg State University, 7-9, University nab., St. Petersburg, 199034, Russia

² Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Permafrost str., Yakutsk, 677010, Russia

³ GeophysPoisk LLC, 15, bldg. 2, lit. A, 26th line Vasilievsky island, St. Petersburg, 199106, Russia

Abstract. Complex geophysical investigations to study subaerial taliks and permafrost in the experimental area of Left Shestakovka basin (Central Yakutia) were carried out in Autumn of 2023. They included GPR research and CDP sounding, as well as electrical prospecting. It was founded that the depth of the talik on the right flank of the river is range from 2 to 14 meters, with an average depth of 6.1 m. Its depth on the left flank of the river varies from 3 to 7.1 meters, with an average value of 4.2 m. The electrical survey was indicated that the near-surface layer is characterized by resistivity variations from 590 to 4459 $\Omega \cdot m$. Its thickness is about 2 m. The next layer with a thickness of 3 – 5.5 m, has resistivity from 100 to 267 $\Omega \cdot m$, and can be associated with talik. The third layer is determined by increasing the resistivity to 2049 $\Omega \cdot m$, which is typical for permafrost. The lowest layer is characterized by decreasing the resistivity to values of about 221 $\Omega \cdot m$. This is can be associated with lithological composition or with groundwater.

1. Введение

Криолитозона покрывает большую часть территории нашей страны, занимая при этом практически всю Сибирь. Текущие климатические изменения приводят к её постепенной деградации [1], что сказывается в том числе и на хозяйственной деятельности. Поэтому комплексное изучение криолитозоны является актуальной насущной задачей, не только в научном, но и в прикладном аспекте. Талики являются важной частью криолитозоны. Они представляют собой толщи осадочных горных пород, находящихся в талом состоянии на протяжении более одного года, и окружённые многолетнемерзлыми или сезонно-мёрзлыми породами. Интерес к изучению таликов обусловлен их влиянием на процессы тепломассопереноса, протекающие в криолитозоне. Их исследование выполняется как путём термометрического мониторинга в скважинах, так и геофизическими методами. При этом особое место, в силу своей мобильности и эффективности, заняли георадиолокация и электроразведка [2].

Эти виды работ на протяжении длительного времени выполняются сотрудниками Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН на специально созданных для этого стационарах [3, 4]. Работы, о которых излагается ниже, являются логическим продолжением планомерных комплексных исследований процессов, протекающих в криолитозоне Центральной Якутии.

2. Район работ и методика их выполнения

Экспериментальный участок «Левая Шестаковка» занимает территорию около 1 км², и расположен в бассейне одноимённой реки, левого малого притока реки Лены, на пологом склоне денудационной равнины с абсолютными высотами 190–210 м. Комплексные геофизические исследования в этом районе выполнялись в период с 29 августа по 4 сентября 2023 г. Они включали в себя георадарное профилирование, зондирование методом ОГТ и вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ). Схема расположения работ представлена на рисунке 1.

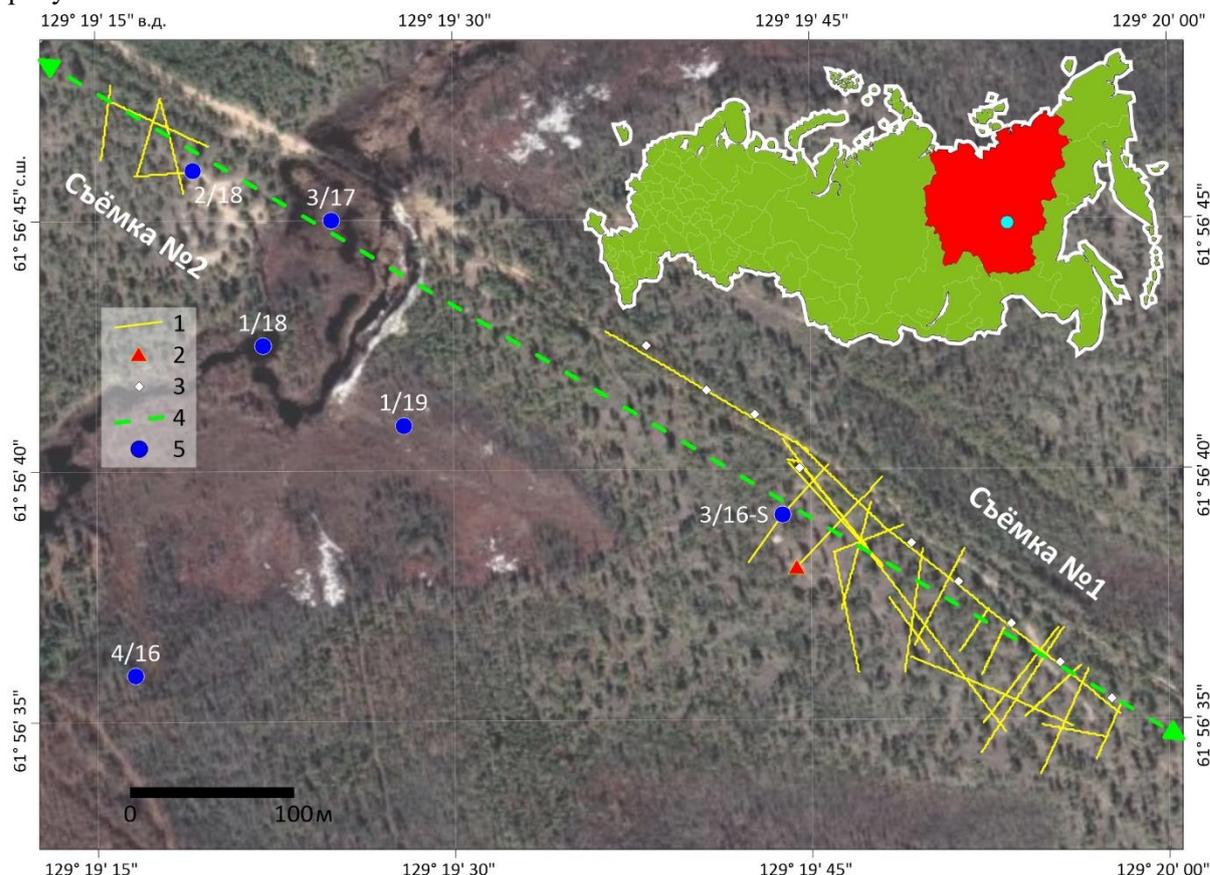


Рисунок 1 – Схема расположения района работ на участке «Левая Шестаковка».

1- георадарные маршруты; 2- пункт зондирования ОГТ; 3- пункты ВЭЗ; 4- фрагмент профиля электротомографии [3]; 5- положение термометрических скважин.

Георадарное профилирование предварялось зондированиями ОГТ для определения скоростных параметров среды. Они выполнялись георадаром ОКО-2 (ООО «Логис», Россия) с раздвижными антеннами АБ-150 (частота зондирующих импульсов 150 МГц). По опыту аналогичных работ, хорошие результаты на используемой аппаратуре могут быть получены при шаге разноса 20 см. К сожалению, ввиду наличия рельефных целевых границ в районе скважины 3/16-S, работы ОГТ выполнялись на удалении 35 м от неё (рис. 1), на участке субгоризонтального залегания слоёв. Обработка данных осуществлялась в рамках модели слоисто-наклонной среды [5]. Полученным годографам соответствуют эффективные диэлектрические проницаемости 10 и 63 единиц сред, в интервале глубин 0 – 2.2 м, и 2.2 – 4.7 м.

После завершения работ ОГТ выполнялось георадарное профилирование на участках, расположенных на обоих берегах реки Левая Шестаковка (рис. 1). В исследованиях использовался тот же прибор, что и при зондированиях ОГТ. Были проанализированы временные георадарные разрезы, полученные в районе скважины 3/16-S, в которой на протяжении многих лет выполняется термометрический мониторинг [3, 4]. Отражение, ассоциируемое с границей между таликом и многолетнемёрзлыми породами, выявляемое на разрезе, должно соответствовать температуре фазового перехода по температурным данным. На момент выполнения работ она располагалась на глубине 7.1 м, что соответствует средней величине диэлектрической проницаемости грунта 15.5 единиц. Оно и было принято для расчётов при обработке данных съёмки № 1. Аналогичное сопоставление георадарных данных и термометрии скважины 2/18 позволило определить диэлектрическую проницаемость грунта съёмки № 2 в 6.9 единиц.

Причину несоответствия диэлектрических проницаемостей, полученных по материалам ОГТ, и путём сравнения с данными термометрии авторы видят в значительных вариациях влажности по разрезу. Это обусловлено, в том числе, и рельефной конфигурацией талика.

По завершении георадарных работ выполнялся профиль ВЭЗ. Его протяжённость составила 396 метров. Он располагался вдоль одного из георадарных маршрутов (рис. 1), а также вдоль геоэлектрического профиля, выполненного в 2016 г. [3]. В работах применялся электроразведочный генератор тока SGD-EGC200 «SKAT IV» СГФП 420.00.00, а также электроразведочный измеритель SGD-EEM «MEDUSA-B2» СГФП 221.00.00-02 Версия V2.18 (НПК «СибГеофизПрибор», Россия). Исследования осуществлялись при симметричной установке Шлюмберже. На профиле было отработано десять пунктов наблюдений с шагом в 50 м. Максимальные разномы составили 100 м, что обеспечивало глубину зондирования примерно до 20 м. Данные ВЭЗ обрабатывались с использованием программы ZondIP 1D (Zond Software LTD, Cyprus). Обработка осуществлялась по стандартной методике. В результате путём подбора были получены эффективные значения удельного электрического сопротивления, а также глубины залегания верхних и нижних границ электрически однородных слоёв.

На рисунке 2 показаны схемы глубин залегания кровли талика и его подошвы по двум выполненным съёмкам. Для их построения применялась картографическая программа Surfer 23.3 (Golden Software Inc., USA). Гридирование осуществлялось методом Inverse Distance с радиусом осреднения 18 м и размером ячейки 5×5 м. Ошибка гридов для первой съёмки кровли талика составила ± 0.13 м и ± 0.59 м для его подошвы; для второй съёмки кровли талика она составила ± 0.07 м и ± 0.11 м для его подошвы.

Как следует из представленных схем, глубина залегания сезонно-мёрзлого слоя на правом берегу реки составляет около 2.3 м и варьирует в пределах от 1.8 до 3.7 м. Заглубление слоя имеется в центральной и южной части, где имеются открытые участки местности. Талик полностью занимает всю территорию съёмки № 1. Его кровля маркируется подошвой сезонно-мёрзлого слоя, а подошва располагается в интервале глубин от 2 до 14 м, при среднем значении 6.1 м.

Выяснено, что глубина залегания сезонно-мёрзлого слоя на левом берегу реки (съёмка № 2) составляет около 3 м, и варьирует в пределах от 2 до 4 м. Заглубление этого слоя регистрируется в восточной присклоновой части. Талик полностью занимает только восточную часть съёмки, и некоторую часть западной. Его подошва располагается в интервале глубин от 3 до 7.1 м, при среднем значении 4.2 м. Наибольшие мощности талика и наиболее глубинные его участки располагаются в склоновой части, и также как на противоположном берегу реки Левая Шестаковка, приурочены к открытым участкам местности.

В целом, в районе работ наличие таликов и большая их мощность, по отношению к соседним участкам, соответствуют открытой местности. Это вполне соответствует результатам математического моделирования [6, 7].

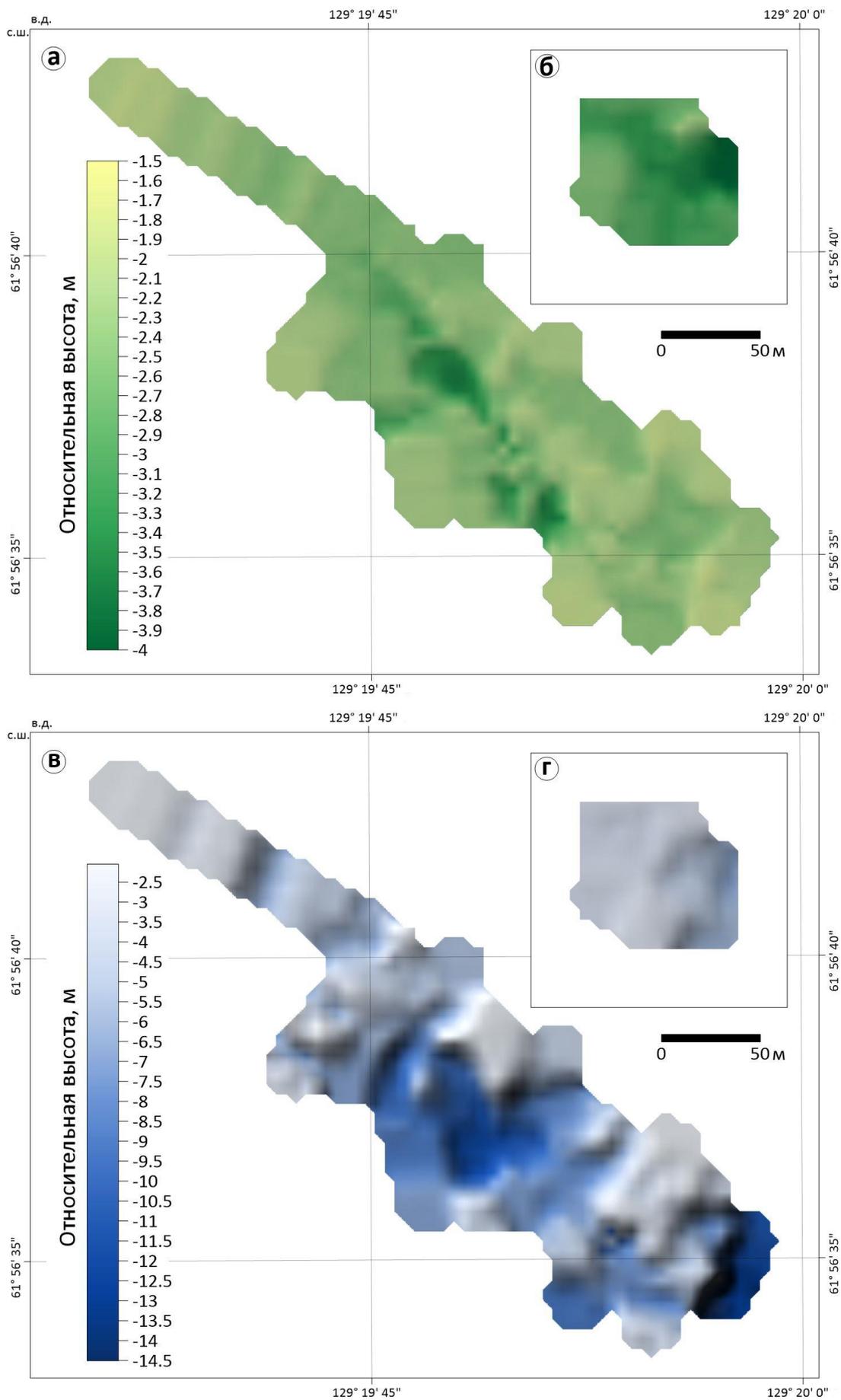


Рисунок 2 – Схемы относительной высоты положения кровли талика на правом (а) и левом (б) берегах реки Левая Шестаковка, а также его подошвы на правом (в) и левом (г) берегах.

Результаты, полученные в ходе электроразведки, дополняют и подтверждают георадарные. Они показывают, что участок, на котором расположен профиль ВЭЗ, неоднороден по электрическим свойствам. Он условно подразделяется на четыре слоя. Приповерхностный, мощностью до 2 м, ассоциируется с сезонно-мёрзлым. Для этого слоя характерна значительная анизотропия удельного сопротивления, которое нарастает вдоль по разрезу в пределах от 590 до 4459 Ом·м. Это подтверждает выводы, сделанные на основе анализа данных ОГТ. Ниже по разрезу следует слой низкоомных пород с удельным сопротивлением от 100 до 267 Ом·м. Он ассоциируется с водоносным горизонтом, т.е. таликом. Этот слой контрастно выделяется на протяжении всего профиля. Его мощность варьирует в пределах от 3 до 5.5 метров. Следующий слой определяется повышением удельного сопротивления до 2049 Ом·м, что характерно для многолетнемёрзлых пород. На разрезе его мощность составляет от 4 до 6 метров. Для последнего, самого нижнего слоя, характерно понижение удельных сопротивлений до значений около 221 Ом·м. Он, вероятно, связан либо с изменением литологического состава [3], либо с наличием грунтовых вод.

3. Выводы

Проведённые комплексные геофизические исследования выявили рельефность и неоднородность залегания подошвы сезонно-мёрзлого слоя, а также подошвы талика. Наибольшие его мощности приурочены к открытым участкам местности. Выполненная работа показала принципиальную возможность детальной съемки глубин залегания кровли и подошвы водоносных таликов на примере небольшого участка. Это важно для оценки запасов подземных вод и определения предпочтительных путей фильтрации в таликовых водоносных горизонтах, а также для решения вопроса о стабильности или изменчивости геометрии таликов при наблюдающихся изменениях климата. Результаты, полученные в ходе электроразведки, дополняют и подтверждают георадарные. Они показывают, что участок, на котором расположен профиль ВЭЗ, неоднороден по электрическим свойствам. Он условно подразделяется на четыре слоя. Приповерхностный, мощностью до 2 м, ассоциируется с сезонно-мёрзлым. Для этого слоя характерна значительная анизотропия удельного сопротивления, которое нарастает вдоль по разрезу в пределах от 590 до 4459 Ом·м. Это подтверждает выводы, сделанные на основе анализа данных ОГТ. Ниже по разрезу следует слой низкоомных пород с удельным сопротивлением от 100 до 267 Ом·м. Он ассоциируется с водоносным горизонтом, т.е. таликом. Этот слой контрастно выделяется на протяжении всего профиля. Его мощность варьирует в пределах от 3 до 5.5 метров. Следующий слой определяется повышением удельного сопротивления до 2049 Ом·м, что характерно для многолетнемёрзлых пород. На разрезе его мощность составляет от 4 до 6 метров. Для последнего, самого нижнего слоя, характерно понижение удельных сопротивлений до значений около 221 Ом·м. Он, вероятно, связан либо с изменением литологического состава [3], либо с наличием грунтовых вод.

4. Благодарности

Авторы благодарят своих коллег Павлову Н.А. и Огонерова В.В. (Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН) за помощь в организации полевых работ; Немчинову А.В. и Андрееву Д.О. (Санкт-Петербургский государственный университет) за помощь в проведении полевых работ. Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда и Якутского научного фонда Проект № 22-17-20040 «Субаэральные и подозёрные талики в сплошной криолитозоне Восточной Сибири: происхождение, современное состояние и реакция на изменение климата».

5. Литература:

- [1] Biskaborn, B.K., Smith, S.L., Noetzli, J. et al. Permafrost is warming at a global scale // *Nat. Commun.*, 2019, vol. 10, pp. 264.
- [2] Sudakova, M.S., Brushkov, A.V., Velikin, S.A., Vladov, M.L., Zykov, Yu.D., Nekljudov, V.V., Olenchenko, V.V., Pushkarev, P.Yu., Sadurtdinov, M.R., Skvortsov, A.G. and Tsarev, A.M. Geophysical methods in permafrost monitoring // *Moscow University Geol. Bull.*, 2022, vol. 6, pp. 141-151.
- [3] 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. and Makarieva O.M. Suprapermafrost subaerial taliks, Central Yakutia, Shestakovka river basin // *Earth's Cryosphere*, 2019, vol. 23, No 1, pp. 40-50.
- [4] Lebedeva, L., Pavlova, N., Khristoforov, I. Geology, structure, ground temperature and groundwater level in aquifer taliks in the Shestakovka River Basin, Eastern Siberia // *Land*, 2023, vol. 12, No 1, pp. 16.
- [5] Popov, S.V. Determination of dielectric permittivity from diffraction traveltime curves within a dipping-layer model // *Earth's Cryosphere*, 2017, vol. 21, No 3, pp. 75-79.
- [6] Popov S.V., Boronina A.S., Lebedeva L.S. 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 // *Ice and Snow*, 2023, vol. 63, No 4, pp. 597-611.
- [7] Popov S.V., Boronina A.S., Lebedeva L.S. "Program for modeling heat and mass transfer processes in permafrost" (FrozenSoil) // Certificate of the registration RUS No. 2023669994. Application No. 2023669430, 09.25.2023. Publ. 09.25.2023. Bull. No. 10.