



Научная статья

Геология

## Выявление субаэральных таликов геофизическими методами в средней части бассейна р. Лена, Центральная Якутия

С.В.Попов<sup>1,2✉</sup>, М.П.Кашкевич<sup>2</sup>, Н.Е.Романова<sup>3</sup>, А.М.Малышева<sup>2</sup>, Л.С.Лебедева<sup>2,4</sup><sup>1</sup> ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия<sup>3</sup> ООО «ГеофизПоиск», Санкт-Петербург, Россия<sup>4</sup> Институт мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

**Как цитировать эту статью:** Попов С.В., Кашкевич М.П., Романова Н.Е., Малышева А.М., Лебедева Л.С. Выявление субаэральных таликов геофизическими методами в средней части бассейна р. Лена, Центральная Якутия // Записки Горного института. 2025. Т. 274. № 16396. С. 63-75. [EDN YEEPZM](#)

### Аннотация

Осенью 2023 г. проведены комплексные геофизические исследования на экспериментальном участке бассейна р. Шестаковка (Центральная Якутия) для выявления особенностей строения приповерхностной части геологического разреза, в частности многолетнемерзлых пород и таликовых зон. В задачи работ входило выполнение георадиолокационных исследований и электроразведки методом сопротивления. При интерпретации использовались данные бурения и термометрии в скважинах. Актуальность работы обусловлена важностью изучения процессов, протекающих в криолитозоне, в связи с глобальными климатическими изменениями, а новизна заключается в уточнении строения района исследований. Средняя по разрезу диэлектрическая проницаемость пород на правом и левом берегах реки составляет 15,5 и 6,9 соответственно. Различия обусловлены влагонасыщенностью и степенью промерзания грунта. Установлено, что глубина залегания подошвы талика на правом берегу реки составляет от 2 до 14 м при среднем значении 6,1 м. На левом берегу реки эта величина варьируется от 3 до 7,1 м при среднем значении 4,2 м. По данным электроразведки среда представляет собой четырехслойный разрез. Верхний слой мощностью около 2 м наиболее неоднородный по удельному сопротивлению и соответствует сезонно-мерзлым грунтам. Подошва нижележащего талика на геоэлектрическом разрезе прослеживается на глубине от 4 до 7 м, что согласуется с данными бурения и георадиолокации. Третий высокомоментный слой соответствует многолетнемерзлым породам. Сопротивление в них возрастает на порядок по сравнению с зоной развития талика и составляет около 2000 Ом·м на фоне 100-270 Ом·м. Подстилающий нижний слой характеризуется снижением удельного сопротивления до 220 Ом·м, что может быть связано с изменением литологического состава или с циркуляцией подземных вод.

### Ключевые слова

талики; многолетнемерзлые породы; георадиолокация; вертикальное электрическое зондирование; Центральная Якутия

### Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда и Якутского научного фонда в рамках проекта № 22-17-20040 «Субаэральные и подзерные талики в сплошной криолитозоне Восточной Сибири: происхождение, современное состояние и реакция на изменение климата».

Поступила: 17.02.2024

Принята: 07.11.2024

Онлайн: 21.05.2025

Опубликована: 25.08.2025

### Введение

Криолитозона покрывает примерно 65 % территории Российской Федерации, занимая практически всю Сибирь, а текущие глобальные климатические изменения приводят к постепенной ее деградации [1]. В результате возникают пагубные последствия [2], одно из которых – активизация термокарста и термоэррозии [3], которая порой приводит к значительной просадке грунта [4, 5]. Даже незначительные деформации, связанные с расширением воды при замерзании, вызывают преждевременное разрушение инфраструктуры – капитальных сооружений, автомобильных

и железных дорог [6, 7]. Другая не менее важная проблема – потенциальная пандемия, обусловленная возможным появлением древних бактерий, которые до этого находились в спящем состоянии [8, 9]. Комплексное изучение криолитозоны, включая ее постепенную деградацию из-за климатических изменений, является актуальной задачей, стоящей перед мировой наукой [10, 11]. В связи с этим необходима организация температурного мониторинга [12-14].

Талики, важная часть криолитозоны, представляют собой толщи горных пород в талом состоянии, существуют непрерывно на протяжении более одного года и окружены многолетнемерзлыми породами [15, 16]. Интерес к ним обусловлен с одной стороны непосредственной связью с изменениями криолитозоны, с другой – тем, что они являются единственными путями питания и разгрузки подземных вод. Распространение таликов и их динамика мало изучены, но исследование этого феномена, понимание его развития в современных условиях позволяют лучше понять и спрогнозировать реакцию криолитозоны и сложной мерзлотно-гидрогеологической системы на происходящие изменения природной среды.

Основой исследования распространения таликов, помимо термометрического мониторинга в скважинах, являются геофизические методы – георадиолокация и электроразведка. Их преимущество заключается в эффективном изучении верхней части геологического разреза на значительной территории без нарушения сплошности напочвенного покрова, актуальном для сохранения тундры. Георадиолокация активно применяется для обнаружения, изучения и картирования таликов различного генезиса и конфигурации, одновременно являясь наименее трудоемким геофизическим методом [17-19]. Метод основан на различиях диэлектрической проницаемости пород в мерзлом и талом состоянии. Кроме того, георадиолокация показала исключительную эффективность при инженерных изысканиях в полярных регионах мира [20]. Множество исследований демонстрирует ее большие возможности при изучении криолитозоны [21-23]. Георадиолокация применима для оценки глубины протаивания и объемной влажности сезонно-талого слоя [24-26]. Электроразведочные методы также доказали свою эффективность для изучения криолитозоны, в частности таликов [27-29], ввиду контрастных различий мерзлых и талых пород по удельному электрическому сопротивлению. Электроразведка активно применяется для мониторинга развития областей мерзлых пород [17, 30].

Важность изучения процессов, протекающих в криолитозоне, нашла отражение в «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности до 2035 года», утвержденной Указом Президента РФ от 26.10.2020 № 645, а также в Постановлении Правительства РФ от 01.11.2023 № 1831 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 9 августа 2013 г. № 681». Постановление указывает на создание «государственного фонового мониторинга состояния многолетней (вечной) мерзлоты». Для реализации задачи в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте разработана соответствующая программа и уже получены первые значимые результаты [31, 32].

В статье излагаются итоги геофизических исследований, выполненных в 2023 г. в ходе полевых работ в бассейне р. Шестаковка (Центральная Якутия). Они проводились для выявления особенностей строения приповерхностной части геологического разреза – многолетнемерзлых пород и таликовых зон.

### Объект исследования

Экспериментальный участок Института мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН «Левая Шестаковка» занимает территорию около 1 км<sup>2</sup> (рис.1) и расположен в бассейне р. Шестаковка, левого малого притока р. Лена, на пологом склоне денудационной равнины с абсолютными высотами 190-210 м. Климат резко континентальный, отличающийся сухостью, среднегодовая температура окружающего воздуха составляет -9,5 °C, средняя многолетняя температура января -40,5 °C, а июля +19,1 °C [33].

Согласно опубликованным данным, верхняя часть геологического разреза до глубины 30 м отмечена рыхлыми песчаными отложениями с редкими прослойками глин. На водоразделах и склонах пески представлены мелко- и среднезернистыми фракциями. Их объемная влажность в зоне

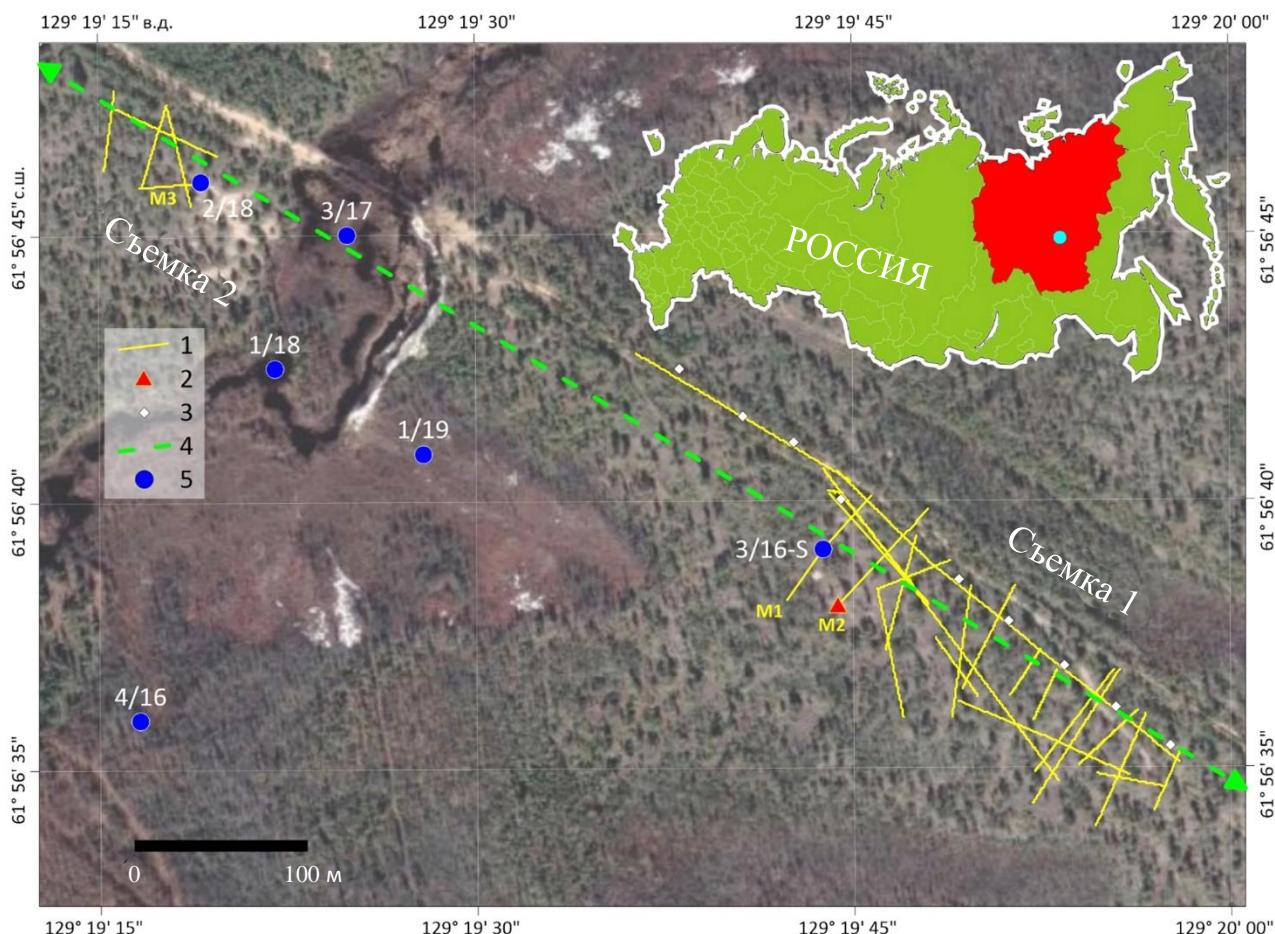


Рис.1. Схема расположения района работ на участке «Левая Шестаковка» [34]

1 – георадарные маршруты; 2 – пункт ОГТ; 3 – пункты ВЭЗ; 4 – фрагмент профиля электротомографии [35];  
 5 – положение термометрических скважин

аэрации не превышает 2-8 % с пористостью 33-35 %. Песчаные отложения, как правило, перекрыты почвенно-растительным слоем, состоящим из мха, лишайников, дернины и лесной подстилки. Мощность слоя может достигать 30 см [33, 35]. В районе исследований развиты нестационарные мерзлые толщи. Их мощность достигает полукилометра; температура горных пород на глубине 100 м составляет от -1,0 до -0,6 °C [15]. Мощность сезонно-талого слоя изменяется от 0,5 м на марях до 3 м на пологих склонах и водоразделах, покрытых сосновым лесом [36]. Недавние исследования установили надмерзлотный субаэральный водоносный талик шириной 180-200 м и протяженностью более 500 м в районе работ. Согласно геофизическим данным, его мощность достигает 20 м [35]. Таким образом, район весьма перспективен в плане изучения таликов, а наличие термометрических скважин (рис.1) открывает большие возможности в верификации геофизических данных и широкие перспективы для последующего математического моделирования [37-39].

## Методы

Для решения поставленной задачи в период с 29 августа по 4 сентября 2023 г. на участке проявления талых пород в районе р. Шестаковка выполнены комплексные геофизические исследования: георадарное профилирование, георадарная съемка методом общей глубинной точки (ОГТ) и вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ). Схема расположения работ представлена на рис.1 [34].

Георадарное профилирование предварялось съемкой методом ОГТ для определения кинематических характеристик локализуемой среды и последующего пересчета временных разрезов в глубинные. Работы выполнялись георадаром ОКО-2 (ООО «ЛОГИС», Россия) с раздвижными антеннами АБ-150 (частота зондирующих импульсов 150 МГц) по стандартной методике [34],

изложенной в [18]. Конструктивная особенность прибора предполагает наличие оптоволоконного кабеля, соединяющего обе антенны. Использовался кабель длиной 10 м, что и определяло максимальную длину расстановки. По опыту работ, исходя из используемой аппаратуры, удовлетворительные результаты достигались при шаге разноса 20 см, т.е. по 10 см в каждую сторону. Максимальное расстояние между антеннами составило 7,65 м. Процесс работ показан на рис.2, а.

После завершения этапа ОГТ коллектив приступил к выполнению георадарного профилирования сначала на правом берегу р. Шестаковка, а затем – на левом. Работы выполнялись с помощью георадара Тритон-М (ООО «ЛОГИС», Россия), частота зондирующих импульсов 100 МГц. Новый георадар Тритон-М впервые опробован в условиях развития многолетнемерзлых пород. Форма и строение антенны (раздвижная гибкая монолыжа) позволяют перемещать ее по заросшей поверхности и без труда огибать мелкие неровности. К преимуществам также относится отсутствие кабелей и других соединений, значительно осложняющих работу в тайге и местах развития густой растительности. Автономный блок регистрации и управления связан с ноутбуком по Wi-Fi. После проведения нескольких тестовых маршрутов установлено, что оптимальной разверткой для получения регистрируемых целевых границ является 400 нс. Съемка производилась пешим порядком, в непрерывном режиме постоянного темпа. Плановая привязка осуществлялась по спутниковому приемоиндикатору Garmin GPSMap64 (Garmin Ltd., США). Прямолинейность маршрутов достигалась выставлением видимых ориентиров на местности. Всего совершено 29 георадарных маршрутов общей протяженностью 2,7 км (см. рис.1). Процесс выполнения показан на рис.2, б. Георадарные данные обрабатывались по стандартной методике, изложенной в публикациях [22, 26, 35], в компьютерных программах GeoScan32 (ООО «ЛОГИС», Россия), Prism2 (Radar Systems, Inc., Латвия). В результате получены глубины залегания целевых границ [34].

Профиль ВЭЗ протяженностью 396 м располагался вдоль одного из георадарных маршрутов (см. рис.1), а также геоэлектрического профиля, выполненного в 2016 г. [35]. Применились электроразведочный генератор тока SGD-EGC200 «SKAT IV» СГФП 420.00.00, электроразведочный измеритель SGD-EEM «MEDUSA-B2» СГФП 221.00.00-02 версия V2.18 (НПК «СибГеофизПрибор», Россия). Измерения выполнялись с использованием четырехэлектродной симметричной установки AMNB (установка Шлюмберже). На профиле ВЭЗ отработано 10 пунктов наблюдений с шагом 50 м. Максимальные разносы составили 100 м, что обеспечило глубину зондирования примерно до 20 м. Разносы питающей линии (AB/2) составляли 1,5; 2; 3; 4; 6; 9; 11; 15; 20; 25; 30; 40 и 50 м. Плановая привязка концов маршрута осуществлялась по спутниковому приемоиндикатору



Рис.2. Ход выполнения ОГТ (а), георадарных (б), электроразведочных (в) работ, бурения (г) и фонтан воды, бьющий из пробуренной скважины (д)



Garmin GPSMap64. Разносы электродов определялись по мерной геодезической ленте. Процесс электроразведочных работ показан на рис.2, в. Данные ВЭЗ обрабатывались с использованием программы ZondIP1d (Zond Software LTD, Кипр). В результате получены значения удельного электрического сопротивления, а также глубины залегания верхних и нижних границ электрически однородных слоев.

## Результаты

Согласно рекомендациям [18] и опыту проведения подобных работ, для получения наиболее качественных результатов ОГТ следует выполнять вдоль профиля с субгоризонтальным залеганием целевых границ. Наиболее правильным было расположить работы вблизи скважины 3/16-S (см. рис.1) для последующего сравнения. Однако конфигурация целевых границ в районе достаточно рельефна (рис.3, а), и качественные материалы ОГТ не могли быть получены. Оптимальное место для работ найдено в 35 м от скважины (см. рис.1). Временной георадарный разрез вдоль профиля ОГТ представлен на рис.3, б. Профили являются типичными для этого района.

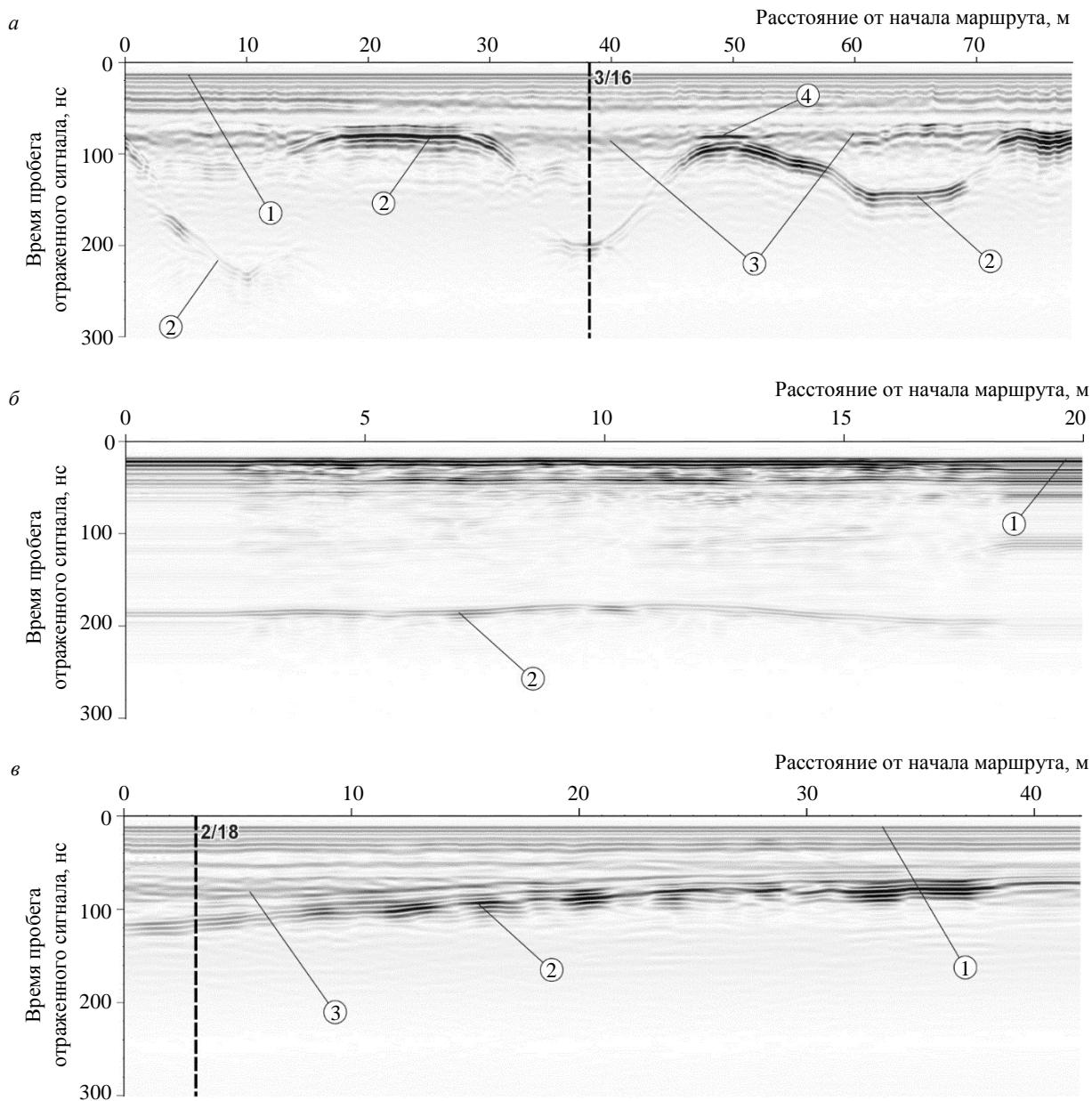


Рис.3. Временные георадарные разрезы по профилям M1 (а), M2 (б), M3 (в) (см. рис.1)

1 – прямая волна; 2 – отражения, сформированные подошвой талика; 3 – отражения, ассоциируемые с сезонно-мерзлым слоем;  
4 – мерзлые фрагменты песчаных отложений, или ледяные линзы; вертикальными пунктирными линиями показано положение термометрических скважин

На профилях отчетливо выделяется прямая волна 1, а также интенсивное отражение 2. Диэлектрическая проницаемость мерзлых песчаных отложений составляет от 2,5 до 5, в зависимости от льдистости, а тех же пород в талом состоянии от 4 до 25, в зависимости от влажности [40]. По материалам полевых наблюдений, влажность песчаных отложений талика составляет 17-20 %, но может и превышать эти значения [16, 31]. Следовательно, коэффициент отражения от границы раздела многолетнемерзлых пород и талика достаточно велик, что выражается контрастным отражением 2 на временном георадарном разрезе.

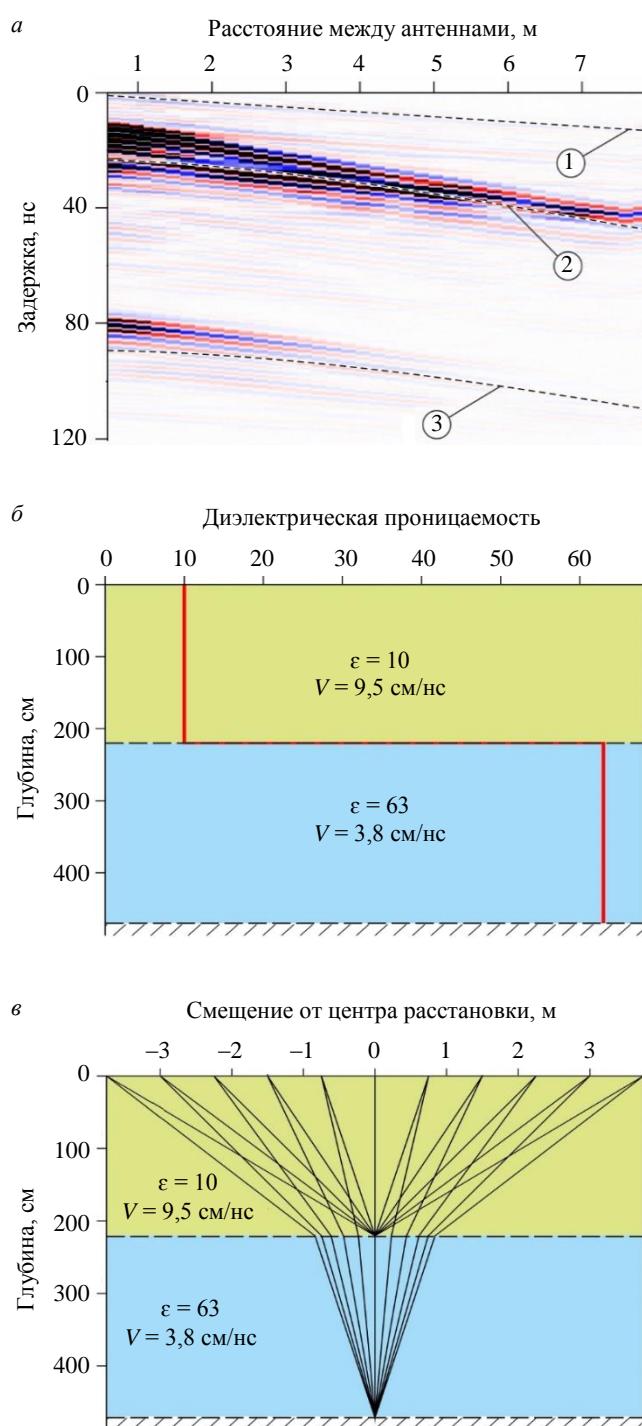


Рис.4. Результаты зондирований ОГТ:  
 наблюдаемый и теоретический годографы (а),  
 диэлектрическая модель среды (б), ход лучей (в)  
 1 – прямой волны; 2 – кровли талика; 3 – подошвы талика

Помимо отражений 1 и 2, на разрезах выделяется большей частью субгоризонтальное и слабоинтенсивное отражение 3, которое может быть связано с границей сезонно-мерзлых пород и талика [16]. Этот маломощный, до 2 м, слой характеризуется относительно пониженной влажностью, составляющей 5-7 % [20, 35]. Таким образом, наличие градиента влажности обуславливает появление границы 3. На некоторых участках она осложнена контрастными отражениями 4, которые, вероятно, можно ассоциировать с мерзлыми, не успевшими оттаять в течение теплых летних месяцев, фрагментами песчаных отложений, или ледяными линзами. Их диэлектрическая проницаемость значительно меньше проницаемости влажных пород талика [40]. Если названные мерзлые фрагменты маломощны, то это приводит к reverberации, наблюдавшейся на разрезах.

Исходя из приведенных рассуждений, в дальнейших расчетах целесообразно рассматривать двуслойную среду. На рис.4, а представлен наблюдаемый годограф ОГТ, полученный в ходе полевых работ, а также результат подбора теоретического годографа. Обработка данных осуществлялась в авторской программе Gaea в рамках модели наклонно-слоистой среды, математическое описание которой дано в работе [41]. Годографы подбирались для границ сезонно-талого слоя и талика 2, а также талика и многолетнемерзлых пород 3. Им соответствуют эффективные значения диэлектрической проницаемости 10 и 63 в интервале глубин 0-2,2 и 2,2-4,7 м (рис.4, б). Ход лучей показан на рис.4, в. На первый взгляд значение диэлектрической проницаемости, равное 63, кажется завышенным, однако результаты бурения (см. рис.2, в) выявляют сильную обводненность отдельных горизонтов. Обоснованно предполагается, что содержание воды может сильно варьироваться в пределах талика, это, в свою очередь, будет приводить к изменению диэлектрической проницаемости в большом диапазоне значений.



На временном георадарном разрезе (см. рис.3, *a*) показано положение скважины 3/16-S, в которой на протяжении многих лет выполняется термометрический мониторинг [36]. Если исходить из того, что отражение 2 связано с границей талика и многолетнемерзлых пород, то глубину ее залегания также можно определить по данным термометрии на момент выполнения профиля (3 сентября 2023 г.). Она будет соответствовать температуре фазового перехода. Данные показывают, что граница с многолетнемерзлыми породами располагается на глубине 7,1 м, следовательно средняя по разрезу диэлектрическая проницаемость среды составляет 15,5. Если применить параметры ОГТ, то глубина залегания границы составит 5,3 м, что почти в полтора раза меньше. В связи со значительными расхождениями в рамках исследования для обеих сред принято значение диэлектрической проницаемости 15,5.

В ходе георадарных работ на противоположном (левом) берегу реки один из маршрутов выполнен вблизи скважины 2/18 (см. рис.1). Временной георадарный разрез показан на рис.3, *b*. На момент выполнения работ (15 ч, 03.09.2023), согласно данным термометрии, фазовая граница располагалась на глубине 5,6 м. После аналогичных расчетов получено значение диэлектрической проницаемости 6,9, которое и было принято для этой съемки.

Схемы глубин залегания кровли талика (т.е. нижней границы сезонно-мерзлого слоя) и его подошвы по обеим съемкам показаны на рис.5. Для построения использовалась картографическая программа Surfer 23.3 (Golden Software Inc., США). Гридирование осуществлялось методом Inverse Distance с радиусом осреднения 18 м и размером ячейки 5×5 м. Ошибка гридов определялась как стандартное отклонение  $N$  измерений  $z_i$  от значений грида  $\tilde{z}_i$  в этой же точке:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (z_i - \tilde{z}_i)^2.$$

Для первой съемки кровли талика  $\sigma$  составляет  $\pm 0,1$  и  $\pm 0,6$  м для его подошвы, для второй съемки  $\sigma$  и кровли талика, и подошвы равна  $\pm 0,1$  м.

Наиболее подходящими условиями для выполнения ВЭЗ обладают среды с субгоризонтальным залеганием целевых границ. Однако, поскольку авторы стремились провести комплексные исследования, этот профиль выполнялся вдоль одного из наиболее протяженных георадарных маршрутов, а также в непосредственной близости от ранее выполненного профиля электротомографии [35] (см. рис.1). Результаты ВЭЗ в виде блоковой модели распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) совмещены с георадарным разрезом, чтобы лучше была видна корреляция (рис.6, *a*). На рис.6, *b* показана та же блоковая модель, нанесенная на геоэлектрический разрез, полученный методом электротомографии [35].

### Обсуждение результатов

Следует отметить, что хорошо подобрать теоретические гидографы не удалось и на рис.4, *a* представлен наиболее приемлемый вариант. Причины этого видятся в диэлектрической анизотропии среды, поскольку даже небольшое изменение ее влажности приводит к значительным вариациям. Это подтверждается теоретическими расчетами. Имеется зависимость диэлектрической проницаемости песчаных отложений  $\tilde{\epsilon}$  от влажности  $\omega$ , рассчитанная на основе соотношения Луэнга [42] для двухкомпонентной среды, при этом предполагается, что водяные включения имеют сферическую форму:

$$\tilde{\epsilon} = \left[ \epsilon_{sk}^{1/3} + \omega \left( \epsilon_w^{1/3} - \epsilon_{sk}^{1/3} \right) \right]^3,$$

где  $\epsilon_w$  и  $\epsilon_{sk}$  – диэлектрическая проницаемость воды и сухого песка (скелета),  $\epsilon_{sk} \approx 4$  [39].

Диэлектрическая проницаемость воды в значительной мере зависит от температуры. В сезонноталом слое она меняется в весьма широких пределах от температуры фазового перехода у кровли талика до близкой к температуре окружающего воздуха и может достигать 15 °C и более в приповерхностной части [33, 35, 36]. В работе [43] приводится эмпирическое соотношение диэлектрической проницаемости воды от ее температуры  $\theta$ :

$$\epsilon_w = 78,54 \left[ 1 - 4,579 \cdot 10^{-3} (\theta - 25) + 1,19 \cdot 10^{-5} (\theta - 25)^2 - 2,8 \cdot 10^{-8} (\theta - 25)^3 \right].$$

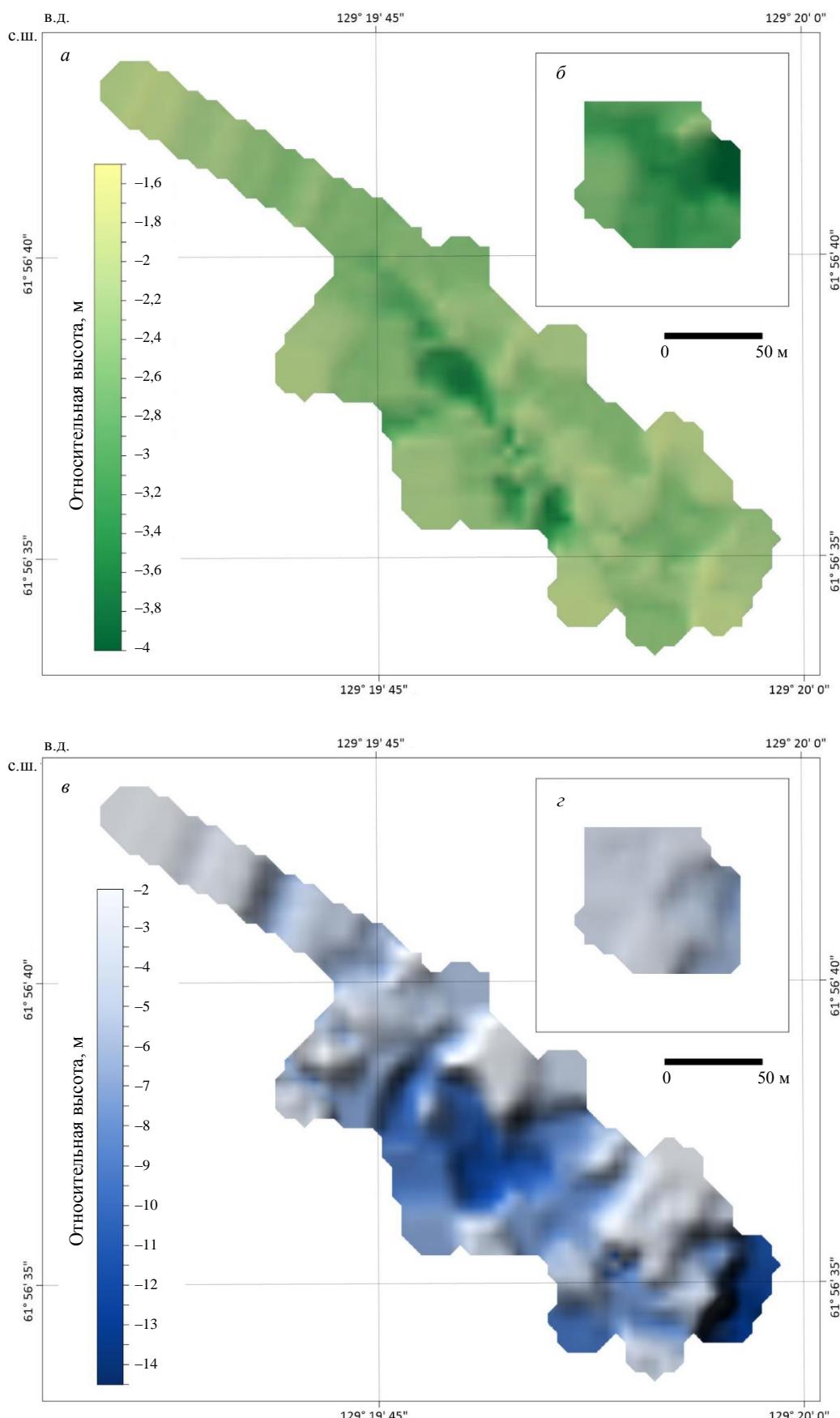


Рис.5. Схемы относительной высоты положения кровли талика на правом (*а*) и левом (*б*) берегах р. Шестаковка, а также его подошвы на правом (*в*) и левом (*г*) берегах [34]

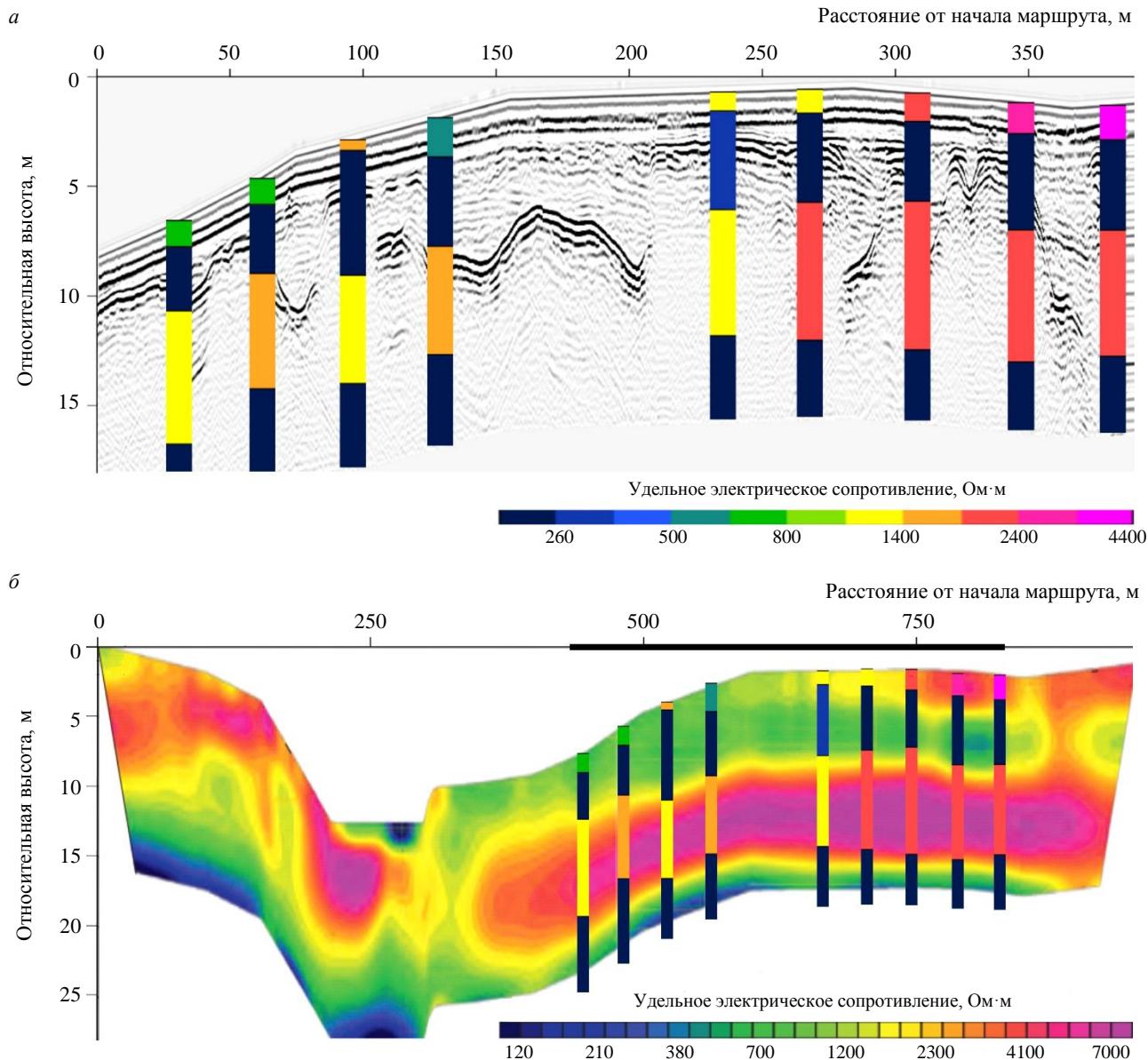


Рис.6. Результаты измерений методом ВЭЗ, совмещенные с георадарным (а) и геоэлектрическим (б) разрезом, полученным методом электротомографии в ходе предыдущих исследований [35]. Утолщенной линией на рис. б показано положение профиля, приведенного на рис. а

Похожие значения могут быть получены по эмпирической формуле Черняка [44]:

$$\varepsilon_w = 80 \left[ 1 + 0,0048(\theta - 20) \right]^{-1}.$$

Обе зависимости показаны на рис.7, а. В интервале указанных температур  $\varepsilon_w$  меняется в среднем от 82 (для 15 °C) до 88 (для 0 °C), что составляет около 7 %. Диэлектрическая проницаемость грунта для двух  $\varepsilon_w$  представлена на рис.7, б. Из рис.7 следует, что изменение влажности грунта от 0 до 10 % приводит к вариациям диэлектрической проницаемости от 4 (сухой грунт) до 6,4 (для 15 °C) и 6,6 (для 0 °C), т.е. на 3 %. Для водонасыщенного грунта при влажности около 30 % разброс кратно увеличивается и составляет 13,9 (для 15 °C) и 14,6 (для 0 °C).

Таким образом, весной и осенью в течение дня, несмотря на геологическую однородность грунта, за счет тени от деревьев, наличия даже незначительных различий напочвенного покрова (которые влияют на процесс распространения тепла в грунт [34, 37, 45]), диэлектрическая неоднородность приповерхностного слоя может оказаться существенной. Этим и объясняются сложности в обработке данных ОГТ.

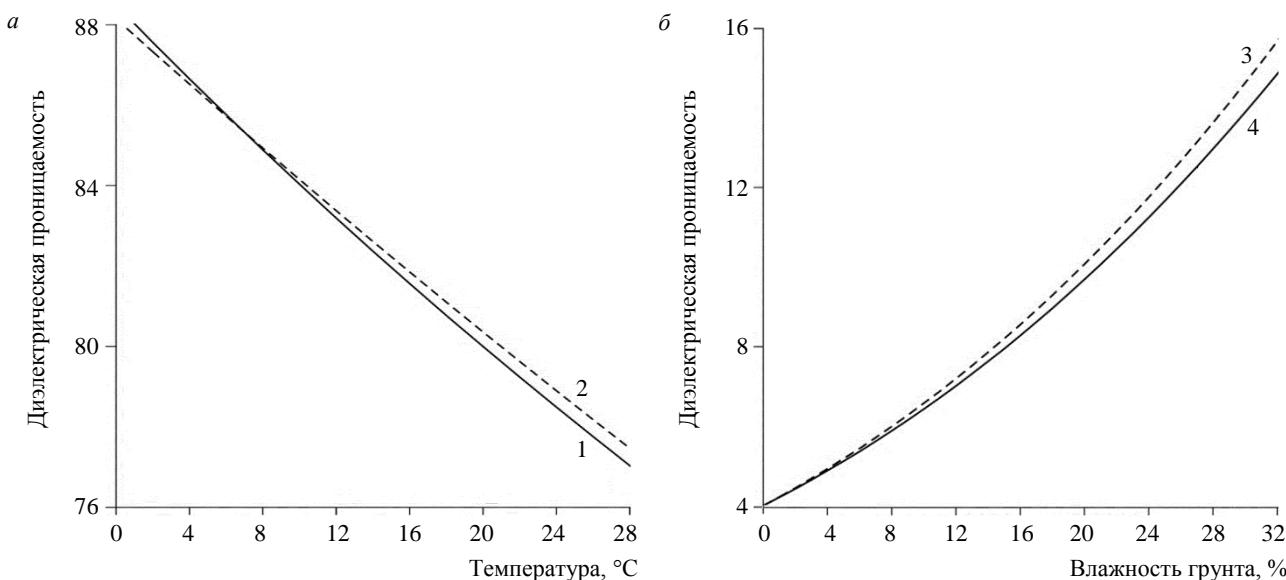


Рис.7. Диэлектрические проницаемости воды от температуры (а) и песчаных отложений от влажности (б)

1 – по модели [44]; 2 – по модели [43]; 3 – при температуре воды 0 °C; 4 – при температуре воды 15 °C

Обращаясь к результатам георадарной съемки, следует отметить, что, согласно рис.5, а, глубина залегания сезонно-мерзлого слоя на правом берегу р. Шестаковка (съемка 1) в среднем составляет около 2,3 м и варьируется в пределах от 1,8 до 3,7 м. Значительное заглубление слоя наблюдается в центральной и южной части, где преобладают открытые участки местности. Талик полностью занимает всю территорию съемки (см. рис.5, в). Его кровля маркируется подошвой сезонно-мерзлого слоя (см. рис.5, а), а подошва располагается в интервале глубин от 2 до 14 м при среднем значении 6,1 м. Отрицательные формы рельефа талика и наиболее глубинные участки также располагаются в центральной, южной и восточной частях съемки. В целом они, как и рельеф сезона-мерзлого слоя, коррелируют с открытыми участками местности. Этому обстоятельству имеется объяснение. На основе результатов математического моделирования [33], выполненного с помощью авторской программы FrozenSoil и базы теплофизических и механических свойств грунтов, горных пород, напочвенного слоя, снега, фирна и льда, можно судить о том, что для открытых участков местности, сложенных песчаными отложениями, на которых практически отсутствует напочвенный слой мха, характерна постепенная деградация криолитозоны, вызванная увеличением мощности талика. Наличие деревьев, кустарников и напочвенного покрова уменьшает поток солнечного тепла, падающего на поверхность и проходящего внутрь грунта. Это в свою очередь препятствует прогрессивному развитию талика, а при большой сплошности растительности даже приводит к его деградации [34].

Как следует из рис.5, б, глубина залегания сезонно-мерзлого слоя на левом берегу р. Шестаковка (съемка 2) в среднем составляет около 3 м и варьируется в пределах от 2 до 4 м. Заглубление слоя наблюдается в восточной части, приуроченной к склону. Талик полностью занимает восточную часть съемки и часть западной (см. рис.5, г). 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 так же, как на противоположном берегу р. Шестаковка, приурочены к открытым участкам местности. Кроме того, на деградации криолитозоны скаживается рельеф местности, однако этот вопрос детально не прорабатывался [34].

Результаты, полученные в ходе электроразведки, указывают на то, что участок, на котором расположен профиль, неоднороден по электрическим свойствам по глубине (см. рис.6, а). Условно его можно разделить на четыре слоя. Верхний (приповерхностный), вероятно, соответствует сезонно-мерзлому. Он представлен породами, сильно различающимися по удельному сопротивлению, растущему по направлению от первой точки ВЭЗ до десятой, от 590 до 4460 Ом·м. Это подтверждает выводы, сделанные на основе анализа данных ОГТ. Мощность слоя разнится в пределах



до 2 м. Ниже по разрезу следует слой низкоомных пород с удельным сопротивлением 100-270 Ом·м, свойственных водоносному горизонту (талику). Он контрастно выделяется на протяжении всего профиля. Мощность этого слоя варьируется в пределах от 3 до 5,5 м. Третий слой определяется повышением удельного сопротивления до 2050 Ом·м, что характерно для многолетнемерзлых пород. На разрезе его мощность составляет 4-6 м. Самым глубоким является слой пониженных удельных сопротивлений около 220 Ом·м, который связан либо с изменением литологического состава [31], либо с наличием грунтовых вод.

Как следует из рис.6, *a*, талик достаточно однороден по удельному сопротивлению, значения которого соответствуют стандартным увлажненным пескам и варьируются в пределах от 100 до 270 Ом·м. Кровля талика по данным ВЭЗ залегает на глубинах от 0,5 до 2 м, а подошва располагается в пределах от 4 до 7 м по разрезу. Сезонно-мерзлый слой и слой многолетнемерзлых пород отличаются неоднородностью сопротивлений, что может быть связано с различием влажности и степенью мерзлоты пород.

При совмещении результатов ВЭЗ с георадарным разрезом не наблюдается полного совпадения целевых границ (см. рис.6, *a*). Это объясняется тем, что на георадарном разрезе приводится 2D-изображение, где положение границы получено в каждой конкретной точке, в то время как ВЭЗ дают информацию в 1D и на измерения влияет ближайшее окружение. Так, фактическая изрезанная подошва талых пород сильно воздействует на результаты расположения границ по ВЭЗ, и талик преобразуется в единый слой, что не является истиной. Тем не менее, методы дополняют друг друга, так как результаты ВЭЗ дают возможность утверждать, что регистрируемые на георадарном разрезе границы действительно корректно маркируют талик.

Как упоминалось, профиль ВЭЗ был выполнен на небольшом удалении от профиля электротомографии [31]. Электротомография более приспособлена для сложнопостроенных сред, в частности для разрезов с негоризонтальным залеганием границ. Однако совмещение данных ВЭЗ с результатами съемки (см. рис.6, *b*) показало удовлетворительное совпадение, что подтверждает оправданность применения метода вертикальных электрических зондирований для выявления областей распространения талика и их характеристик.

### Заключение

На примере тестового участка в районе р. Шестаковка показана эффективность комплексирования методов георадиолокации и электроразведки в модификации ВЭЗ. Рассмотрены сложности, возникающие при обработке и интерпретации полученных данных. Научная новизна работы заключается в выполнении редких в инженерной геофизике георадарных зондирований методикой ОГТ. Анализ данных и материалов со скважины наглядно продемонстрировал неоднозначность в определении скорости распространения электромагнитных волн в пределах всего слоя талых пород из-за крайне неравномерной обводненности. Выполнены теоретические расчеты зависимости диэлектрической проницаемости от влажности грунта, которые объясняют полученное расхождение результатов измерений. Указано на необходимость комплексирования геофизики с данными бурения и термометрии.

Научная новизна представленной работы заключается также в выполнении детальных геофизических исследований, которые дали возможность определить морфологию выделенных пластов, включая сезонно-мерзлый слой, талик и подстилающие многолетнемерзлые породы. По результатам исследования построены схемы положения кровли и подошвы талика на территории работ. Наибольшие мощности талика и, соответственно, наиболее заглубленная кровля многолетнемерзлых пород приурочены к открытым участкам местности.

Проведенное исследование показало 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 стабильности или изменчивости конфигурации таликов при наблюдающихся изменениях климата. Участок «Левая Шестаковка», в силу контрастности физических свойств и хорошей изученности, можно рекомендовать в качестве эталонного объекта для опробования методик и новых образцов аппаратуры при изучении криолитозоны.

Авторы благодарят коллег Н.А.Павлову и В.В.Огонерова (Институт мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН) за помощь в организации полевых работ; А.В.Немчинову и Д.О.Андрееву (Санкт-Петербургский государственный университет) за помощь в проведении полевых работ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J. et al. Permafrost is warming at a global scale // Nature Communications. 2019. Vol. 10. № 264. [DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4](https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4)
2. 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 Российской академии наук. 2022. Т. 92. № 4. С. 303-314. [DOI: 10.31857/S0869587322040053](https://doi.org/10.31857/S0869587322040053)
3. Costard F., Gautier E., Brunstein D. et al. Impact of the global warming on the fluvial thermal erosion over the Lena River in Central Siberia // Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34. Iss. 14. № L14501. [DOI: 10.1029/2007GL030212](https://doi.org/10.1029/2007GL030212)
4. Kizyakov A.I., Wetterich S., Günther F. et al. Landforms and degradation pattern of the Batagay thaw slump, Northeastern Siberia // Geomorphology. 2023. Vol. 420. № 108501. [DOI: 10.1016/j.geomorph.2022.108501](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108501)
5. Syasko V., Shikhov A. Soil deformation model analysis in the processing of the geotechnical monitoring results // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 266. № 03014. [DOI: 10.1051/e3sconf/202126603014](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126603014)
6. Брушков А.В., Алексеев А.Г., Бадина С.В. и др. Опыт эксплуатации сооружений и необходимость управления тепловым режимом грунтов в криолитозоне // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 742-756.
7. Трифонов О.В., Силкин В.М., Черный В.П. и др. Прогнозирование напряженно-деформированного состояния магистрального газопровода «Сила Сибири» на участках развития опасных инженерно-геокриологических процессов на основе математических моделей // Вести газовой науки. 2020. № 2 (44). С. 34-50.
8. Jansson J.K., Taş N. The microbial ecology of permafrost // Nature Reviews Microbiology. 2014. Vol. 12. Iss. 6. P. 414-425. [DOI: 10.1038/nrmicro3262](https://doi.org/10.1038/nrmicro3262)
9. Margesin R., Collins T. Microbial ecology of the cryosphere (glacial and permafrost habitats): current knowledge // Applied Microbiology and Biotechnology. 2019. Vol. 103. Iss. 6. P. 2537-2549. [DOI: 10.1007/s00253-019-09631-3](https://doi.org/10.1007/s00253-019-09631-3)
10. Dobinski W. Permafrost // Earth-Science Reviews. 2011. Vol. 108. Iss. 3-4. P. 158-169. [DOI: 10.1016/j.earscirev.2011.06.007](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.06.007)
11. Буффар Т., Урюпова Е., Додд К. и др. Научное сотрудничество: мониторинг вечной мерзлоты циркумполярной зоны и обмен данными // Арктика и Север. 2021. № 45. С. 184-208. [DOI: 10.37482/issn2221-2698.2021.45.184](https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2021.45.184)
12. Брушков А.В. Проблемы создания системы государственного мониторинга вечной мерзлоты // Фундаменты. 2022. № 3 (9). С. 4-9.
13. Konstantinov P., Zhelezniak M., Basharin N. et al. Establishment of Permafrost Thermal Monitoring Sites in East Siberia // Land. 2020. Vol. 9. Iss. 12. № 476. [DOI: 10.3390/land9120476](https://doi.org/10.3390/land9120476)
14. 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. 2021. Vol. 1064. № 012038. [DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012038](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1064/1/012038)
15. Бойцов А.В. Условия формирования и режим склоновых таликов в Центральной Якутии // Криогидрогеологические исследования. Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР, 1985. С. 44-55.
16. O'Neill H.B., Roy-Leveillee P., Lebedeva L., Feng Ling. Recent advances (2010–2019) in the study of taliks // Permafrost and Periglacial Processes. 2020. Vol. 31. Iss. 3. P. 346-357. [DOI: 10.1002/ppp.2050](https://doi.org/10.1002/ppp.2050)
17. Erji Du, Lin Zhao, Defu Zou et al. Soil Moisture Calibration Equations for Active Layer GPR Detection – a Case Study Specially for the Qinghai–Tibet Plateau Permafrost Regions // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. Iss. 4. № 605. [DOI: 10.3390/rs12040605](https://doi.org/10.3390/rs12040605)
18. Venkateswarlu B., Tewari V.C. Geotechnical Applications of Ground Penetrating Radar (GPR) // Journal of Indian Geological Congress. 2014. Vol. 6 (1). P. 35-46.
19. Дьякова Г.С., Горяевчева А.А., Останин О.В. и др. Геофизические исследования внутреннего строения гляциально-мерзлотных каменных образований Центрального Алтая // Лед и Снег. 2020. Т. 60. № 1. С. 109-120. [DOI: 10.31857/S2076673420010027](https://doi.org/10.31857/S2076673420010027)
20. Попов С.В., Поляков С.П., Пряхин С.С. и др. Строение верхней части ледника в районе планируемой взлетно-посадочной полосы станции Мирный, Восточная Антарктида (по материалам работ 2014/15 года) // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 1. С. 73-84. [DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-1\(73-84\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-1(73-84))
21. Campbell S., Affleck R.T., Sinclair S. Ground-penetrating radar studies of permafrost, periglacial, and near-surface geology at McMurdo Station, Antarctica // Cold Regions Science and Technology. 2018. Vol. 148. P. 38-49. [DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.12.008](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.12.008)
22. Sudakova M., Sadurtdinov M., Skvortsov A. et al. Using Ground Penetrating Radar for Permafrost Monitoring from 2015-2017 at CALM Sites in the Pechora River Delta // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. Iss. 16. № 3271. [DOI: 10.3390/rs13163271](https://doi.org/10.3390/rs13163271)
23. Саввин Д.В., Федорова Л.Л., Соловьев Е.Э. Опыт георадиолокационных исследований при инженерно-геологических изысканиях в Центральной Якутии // Инженерные изыскания. 2018. Т. XII. № 7-8. С. 92-100. [DOI: 10.25296/1997-8650-2018-12-7-8-92-100](https://doi.org/10.25296/1997-8650-2018-12-7-8-92-100)
24. Yongping Wang, Huijun Jin, Guoyu Li. Investigation of the freeze-thaw states of foundation soils in permafrost areas along the China–Russia Crude Oil Pipeline (CRCOP) route using ground-penetrating radar (GPR) // Cold Regions Science and Technology. 2016. Vol. 126. P. 10-21. [DOI: 10.1016/j.coldregions.2016.02.013](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.02.013)
25. Hauck C. New Concepts in Geophysical Surveying and Data Interpretation for Permafrost Terrain // Permafrost and Periglacial Processes. 2013. Vol. 24. Iss. 2. P. 131-137. [DOI: 10.1002/ppp.1774](https://doi.org/10.1002/ppp.1774)



26. Оленченко В.В., Гагарин Л.А., Христофоров И.И. и др. Строение участка развития термосуффозионных процессов в пределах Бестяхской террасы реки Лены по геофизическим данным // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 5. С. 16-26. [DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-5\(16-26\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-5(16-26))
27. Полицина А.В., Котин И.С., Степанов Д.В. и др. Наземная электротомография при оконтуривании таликовых зон (п-ов Таймыр) // Записки Горного института. 2013. Т. 200. С. 76-80.
28. Sjöberg Y., Marklund P., Pettersson R., Lyon S.W. Geophysical mapping of palsa peatland permafrost // The Cryosphere. 2015. Vol. 9. Iss. 2. P. 465-478. [DOI: 10.5194/tc-9-465-2015](https://doi.org/10.5194/tc-9-465-2015)
29. Копылов Д.В., Садуртдинов М.Р. Изучение талика под малым водотоком методом бесконтактной электроразведки // Криосфера Земли. 2020. Т. XXIV. № 6. С. 45-54. [DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-6\(45-54\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-6(45-54))
30. Гагарин Л.А., Бажин К.И., Оленченко В.В. и др. Выявление участков потенциального термосуффозионного разуплотнения грунтов вдоль федеральной автодороги А-360 «Лена» в Центральной Якутии // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 3. С. 61-68. [DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-3\(61-68\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-3(61-68))
31. Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В. и др. Развитие геокриологического мониторинга природных и технических объектов в криолитозоне Российской Федерации на основе систем геотехнического мониторинга топливно-энергетического комплекса // Криосфера Земли. 2022. Т. XXVI. № 4. С. 3-18. [DOI: 10.15372/KZ20220401](https://doi.org/10.15372/KZ20220401)
32. Демидов Н.Э., Веркулич С.Р., Анисимов М.А., Угрюмов Ю.В. Концепция и первые результаты проекта создания государственной системы мониторинга многолетней мерзлоты РФ на базе наблюдательной сети Росгидромета // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: Материалы V Всероссийской научно-практической конференции, 23-25 ноября 2022, Иркутск, Россия. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного университета, 2023. С. 384-387.
33. Варламов С.П., Жирков А.Ф., Находкин Д.А. Температурный режим почвогрунтов при нарушении покровов в современных климатических условиях Центральной Якутии // Наука и образование. 2017. Т. 22. № 4. С. 65-71.
34. Попов С., Кашкевич М., Романова Н. и др. Результаты геофизических работ по изучению субаэральных надмерзлотных таликов района реки Шестаковка, Центральная Якутия // 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), 26-29 марта 2024, Якутск, Россия. Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2024. С. 545-550. [DOI: 10.53954/9785604990100\\_545](https://doi.org/10.53954/9785604990100_545)
35. Лебедева Л.С., Бажин К.И., Христофоров И.И. и др. 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\(40-50\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1(40-50))
36. Лебедева Л.С., Башиев Н.Е., Павлова Н.А. и др. Температура пород в слое годовых теплообменов в районе распространения надмерзлотных таликов в Центральной Якутии // Криосфера Земли. 2023. Т. XXVII. № 2. С. 3-15. [DOI: 10.15372/KZ20230201](https://doi.org/10.15372/KZ20230201)
37. 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 // Лед и Снег. 2023. Т. 63. № 4. С. 597-611. [DOI: 10.31857/S2076673423040130](https://doi.org/10.31857/S2076673423040130)
38. Weibo Liu, Fortier R., Molson J., Lemieux J.-M. A conceptual model for talik dynamics and icing formation in a river floodplain in the continuous permafrost zone at Salluit, Nunavik (Quebec), Canada // Permafrost and Periglacial Processes. 2021. Vol. 32. Iss. 3. P. 468-483. [DOI: 10.1002/ppp.2111](https://doi.org/10.1002/ppp.2111)
39. Ohara N., Jones B.M., Parsekian A.D. et al. A new Stefan equation to characterize the evolution of thermokarst lake and talik geometry // The Cryosphere. 2022. Vol. 16. Iss. 4. P. 1247-1264. [DOI: 10.5194/tc-16-1247-2022](https://doi.org/10.5194/tc-16-1247-2022)
40. Финкельштейн М.И., Мендельсон В.Л., Кутев В.А. Радиолокация слоистых земных покровов. М.: Советское Радио, 1977. 174 с.
41. Попов С.В. Определение диэлектрической проницаемости по годографам дифрагированных волн в рамках модели наклонно-слоистой среды // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 3. С. 83-87. [DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-3\(83-87\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-3(83-87))
42. Looyenga H. Dielectric constants of heterogeneous mixtures // Physica. 1965. Vol. 31. Iss. 3. P. 401-406. [DOI: 10.1016/0031-8914\(65\)90045-5](https://doi.org/10.1016/0031-8914(65)90045-5)
43. Ray P.S. Broadband Complex Refractive Indices of Ice and Water // Applied Optics. 1972. Vol. 11. Iss. 8. P. 1836-1844. [DOI: 10.1364/AO.11.001836](https://doi.org/10.1364/AO.11.001836)
44. Черняк Г.Я. Электромагнитные методы в гидрогеологии и инженерной геологии. М.: Недра, 1987. 213 с.
45. Сосновский А.В., Осокин Н.И. Влияние мохового и снежного покровов на устойчивость многолетней мерзлоты на Западном Шпицбергене при климатических изменениях // Вестник Кольского научного центра РАН. 2018. № 3. С. 178-184. [DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2018.10.3.178-184](https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2018.10.3.178-184)

**Авторы:** Сергей Викторович Попов, д-р геол.-минерал. наук, ведущий инженер, доцент, s.popov@spbu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1830-8658> (ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия; Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия), Марина Петровна Кашкевич, канд. геол.-минерал. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-3600-5570> (Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия), Наталия Евгеньевна Романова, ведущий геофизик (ООО «ГеофизПоиск», Санкт-Петербург, Россия), Алиса Максимовна Малышева, студент (Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия), Людмила Сергеевна Лебедева, канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-7498-9902> (Институт мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН, Якутск, Россия; Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.