

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГИГАНТСКОЙ НАЛЕДИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД Р. АНМАНГЫНДА (МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ) ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

В.В. Оленченко¹, О.М. Макарьева^{2,3}, А.А. Землянскова^{2,3}, А.А.
Осташов^{2,4}, А.С. Калганов¹, А.В. Чекрыжов¹

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090,
Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-
Петербург, Университетская набережная, д. 7–9, Россия

³Северо-Восточный государственный университет, 685000, Магадан,
Портовая ул., 13, Россия

⁴Государственный гидрологический институт, 199004, Санкт-
Петербург, 2-ая линия В.О., 23, Россия

Аннотация. Гигантские наледы, распространенные на Северо-Востоке, являются индикаторами водообменных процессов в криолитозоне. Развитие представлений о процессах наледообразования актуально как с фундаментальной точки зрения изучения эволюции криолитозоны, так и с практической – для разработки мер противоналедной опасности. Наледь в бассейне р. Анмангында (площадь наледной поляны 7 км²) считается репрезентативной для региона, её исследования проводятся с 1962 г. В пределах наледной поляны в 2022 г. в период максимального оттаивания сезонномёрзлого слоя были проведены зондирования методом электротомографии с целью выявления подрусловых таликов и обводнённых разломных зон в коренных породах, включая локальные участки разгрузки подземных вод. В результате установлено, что в пределах основных протоков подрусловые талики развиты до глубины около 30 м. По результатам 2-D инверсии локальными аномалиями пониженного электросопротивления

маркируются каналы фильтрации подземных вод. В трёхмерных геоэлектрических моделях на участках разгрузки подземных вод выделяются трубообразные аномалии пониженного УЭС, интерпретируемые как каналы фильтрации в аллювии и фильтрации в аллювии и зоне экзогенной трещиноватости в коренных породах, сложенных песчано-глинистыми сланцами, а также линейные вертикальные аномалии пониженного УЭС, интерпретируемые как разломы. На вертикальных срезах трёхмерных резистивных моделей прослеживается связь между разломами и каналами фильтрации в аллювии и зоне экзогенной трещиноватости. В правобережье долины установлены геоэлектрические признаки сквозных таликов в коренных породах, вероятно связанных с разломной тектоникой. Предполагается, что выявленные разломы являются дополнительными путями транзита подземных вод в долине р. Анмангында наряду с аллювиальным водоносным горизонтом и зоной экзогенной трещиноватости коренных пород.

Ключевые слова: гигантская наледь; р. Анмангында; электротомография; подземные воды; талик; разлом; удельное электрическое сопротивление; криолитозона

Финансирование: полевые исследования выполнены при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета «Комплексная оценка естественных и антропогенных факторов интенсификации водообменных процессов криолитозоны в условиях изменения климата» (№ 94034170). Обработка и интерпретация геофизических данных выполнена при поддержке проекта Программы фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-0024.

**GEOCRYOLOGICAL CONDITIONS OF THE FORMATION OF
GIANT SPRING AUFELS AT THE ANMANGYND A RIVER (MAGADAN
REGION) ACCORDING TO GEOPHYSICAL DATA**

Vladimir Olenchenko¹, Olga Makarieva^{2,3}, Anastasia Zemlianskova^{2,3}, Andrey Ostashov^{2,4}, Alexander Kalganov¹, Andrey Chekryzhov¹

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 3 Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

²St. Petersburg State University, 7-9 Universitetskaya embankment, St. Petersburg, 199034, Russia

³North-Eastern State University, 13 Portovaya, Magadan, 685000, Russia

⁴State Hydrological Institute, 23 Vasilyevsky Island, 2nd line, St. Petersburg, 199004, Russia

Abstract. Giant aufeis fields, common in the Northeast of Russia, are the indicators of water exchange processes in cryosphere. The development of ideas about icing processes are relevant both from the fundamental point of view of studying the evolution of the permafrost, and from a practical point of view – for the development of aufeis hazard measures. The aufeis in the Anmangynda river basin (aufeis glade area 7 km²) is considered to be representative of the region, and its studies have been carried out since 1962. In 2022, during the period of maximum thawing of the active layer Electrical Resistivity Tomography (ERT) soundings were carried out at the aufeis glade aiming to identify underchannel taliks and flooded fault zones in bedrock, including local areas of groundwater discharge. It was found that within the main river channels there are underchannel taliks up to 30 m deep. According to the results of 2-D inversion, local anomalies of low electrical resistivity mark groundwater filtration channels. In 3D geoelectrical models, pipe-like anomalies of low resistivity are identified in the areas of groundwater discharge, interpreted as filtration channels in the alluvium and the zone of exogenous fracturing in bedrock formed by sandy–clay shales, as well as linear vertical anomalies of low resistivity, interpreted as faults. On vertical sections of 3-D

resistive models, a connection between faults and filtration channels in alluvium and a layer of exogenous fracturing is traced. In the right bank of the valley, geoelectric signs of taliks in bedrock, presumably associated with fault tectonics, have been established. It is assumed that the identified faults are the additional transit routes for groundwater in the Anmangynda river valley, along with the alluvial aquifer and the zone of exogenous fracturing of bedrock.

Keywords: giant aufeis; the Anmangynda river; electrical resistivity tomography; groundwater; talik; fracture; resistivity; cryosphere

Funding: the field studies were supported by St. Petersburg State University «Comprehensive assessment of natural and anthropogenic factors of intensification of water exchange processes in the permafrost zone under conditions of climate change» (project 94034170). The processing of geophysical data was partially supported by the project of the Program of Fundamental Scientific Research No FWZZ-2022-0024.

1. Введение

Наледи подземных вод характерны для областей прерывистого и сплошного типов распространения многолетнемёрзлых пород, они являются мощным регулятором водного и ледового режима рек в горных районах криолитозоны, участвуют в формировании речной сети, а их ежегодное образование и разрушение сопровождается зимним затоплением территории, пучением грунтов, термокарстом и термоэрозией [Romanovsky, 1973; Alekseev, 2015]. В связи с этим задача изучения и прогноза «наледной формы криогенного морфолитогенеза» [Alekseev, 2015] приобретает особую актуальность.

Основные представления о развитии наледей были сформированы в прошлом веке [Kalabin, 1957; Tolstikhin, 1974], однако в настоящее время не решены еще многие фундаментальные вопросы, касающиеся геологической деятельности наледных процессов и определяющих их факторов. При

изучении наледей используют различные методы, такие как визуальные наблюдения, геодезические измерения, фотограмметрию для определения объёма льда и др. Для изучения внутреннего строения наледей и наледных полей перспективными являются геофизические методы, однако в современной литературе представлено ограниченное число публикаций по этой тематике.

Так, в работе [Liu et al., 2021] показаны результаты комплексирования электротомографии и георадиолокации для определения границ талика и разработки трехмерной концептуальной модели локального сужения подруслового талика, который является источником наледных вод на севере штата Квебек, Канада. В Северо-Центральной Монголии на участках образования наледей выполнены зондирования методом электротомографии на двух профилях длиной по 485 м с шагом 5 м до глубины около 85 м [Walther et al., 2021]. В результате по аномалиям низкого УЭС авторами предположено, что источник, формирующий наледь, имеет связь с разломом.

Комплексность объектов изучения – наледей, наледных полей и наледных процессов – требует междисциплинарного подхода и синтеза различных видов данных мониторинга и специальных наблюдений. С 2020 г. на гигантской наледи в бассейне р. Анмангынды (Верхнеколымское нагорье, Магаданская область) ведутся работы по развитию комплексного стационара [Makarieva et al., 2021]. В настоящее время в районе исследования действует круглогодичная сеть мониторинга за климатическими, геокриологическими, гидрологическими и гидрогеологическими процессами, проводятся специальные виды работ по наблюдению за динамикой характеристик гигантской наледи. В пределах наледной поляны был проведен комплекс геофизических исследований. Данные метода ЗСБ показали, что места выходов подземных вод на поверхность выше наледной поляны пространственно совпадают с выходом на поверхность крутопадающих зон пониженного УЭС, интерпретируемых как разломные зоны [Potapov et al., 2022]. По данным георадиолокации были выявлены признаки источников

подземных вод в аллювии долины р. Анмангынды, а пробуренная в аномалии скважина вскрыла напорные воды [Olenchenko et al., 2023].

Целью настоящего исследования стало дальнейшее изучение мерзлотно-гидрогеологического строения разреза наледной поляны, а именно выявление подрусловых таликов и обводнённых разломных зон в коренных породах в период максимального оттаивания деятельного слоя методом электротомографии (ЭТ). Для заверки геофизических материалов использовались также данные скважинной термометрии.

2. Характеристика объекта

Анмангындинская наледь относится к сезонным оледенениям, широко распространённым в горной криолитозоне Северо-Востока. Она ежегодно формируется в долине одноименной реки. В 2000–2022 гг. по данным снимков Landsat максимальная площадь наледи достигала 5.4 км², что может соответствовать расчетной величине объема льда 8.2 млн м³ [Zemlianskova et al., 2023a]. По данным полевых наблюдений в 2020–2022 гг. толщина льда в отдельных точках наледи может достигать 5 м [Zemlianskova et al., 2023b]. В 1962-1990 гг. на наледи проводились наблюдения за режимом процессов наледообразования [Report..., 1977], а с 2020 гг. группой авторов ведутся комплексные круглогодичные исследования [Makarieva et al., 2021].

Для бассейна р. Анмангынды характерно повсеместное распространение многолетней мерзлоты мощностью от 100 до 450 м, иногда прерывающейся в таликовых зонах [Букаев, 1969]. Геологическое строение представлено осадочными породами верхнего триаса, юры и мела [Geological map, 1968]. Долина р. Анмангынды состоит преимущественно из крупно- и среднегалечного материала с подчиненным количеством мелких валунов, гравия, песков, супесей мощностью 6-12 м.

В пределах наледной поляны, в верхней её части, в 1966 году сотрудниками ВСЕГИНГЕО Ю.Н. Бурмистенко, Н.Н. Барохов и Ф.А. Астаховым были выполнены вертикальные электрические зондирования

(ВЭЗ) в ограниченном объёме из 4 точек [Solovieva, 1967]. Расстояние между точками было равным 100–150 м, а максимальные разности достигали 680 м. Направление разностей АВ совпадало с направлением речной долины. Установленная мощность высокоомных пород, интерпретируемых как мерзлота, составляла 2, 20 и 12 м. Эти породы подстилались слоем с УЭС 100 Ом·м и менее, а в центральной части долины с глубины 30 м выявлены породы с УЭС менее 30 Ом·м. В то время на основании данных ВЭЗ исследователи сделали вывод о существовании глубокого сквозного талика выше наледи р. Амангында. Однако они не учитывали, что некоторые пачки сланцев обладают очень низким УЭС даже в мерзлом состоянии из-за большого количества пирита.

3. Методика исследований

Электроразведочные методы весьма эффективны при геокриологических исследованиях [Kneisel et al., 2008; Zykov, 2007], а среди множества этих методов в настоящее время наиболее часто применяется электротомография. Хорошая информативность метода обусловлена высокой контрастностью удельного электрического сопротивления (УЭС) мёрзлых и талых пород, развитостью математического аппарата двумерной и трёхмерной инверсии, что позволяет получать реалистичные геоэлектрические модели сложнопостроенных сред.

Исследования выполнены методом ЭТ в профильном и площадном вариантах для построения 2-D и 3-D геоэлектрических моделей среды.

Профиль №1 длиной 1675 м пересекал наледную поляну через область развития максимальной толщины льда и проходил вблизи термометрической скважины (рис. 1). Профиль №2 длиной 1800 м проходил вдоль георадарного профиля зимней съёмки и пересекал место вскрытия напорного источника подземных вод (скважина № 3), выявленного по данным георадиолокации в марте 2022 г.

Площадные исследования проведены на месте образования ледяного бугра (Площадка № 1) по сети 5×20 м и вблизи зимней скважины №3 (Площадка № 2) по сети 5×25 м. На обеих площадках зондирования выполнены на 5 профилях длиной по 235 м с шагом 5 м по профилю (рис. 2).

Измерения электрического поля проведены многоэлектродной многоканальной электроразведочной станцией Скала-48к12. Последовательность подключения электродов соответствовала прямой и встречной трёхэлектродным установкам и взаимной симметричной установке Шлюмберже.

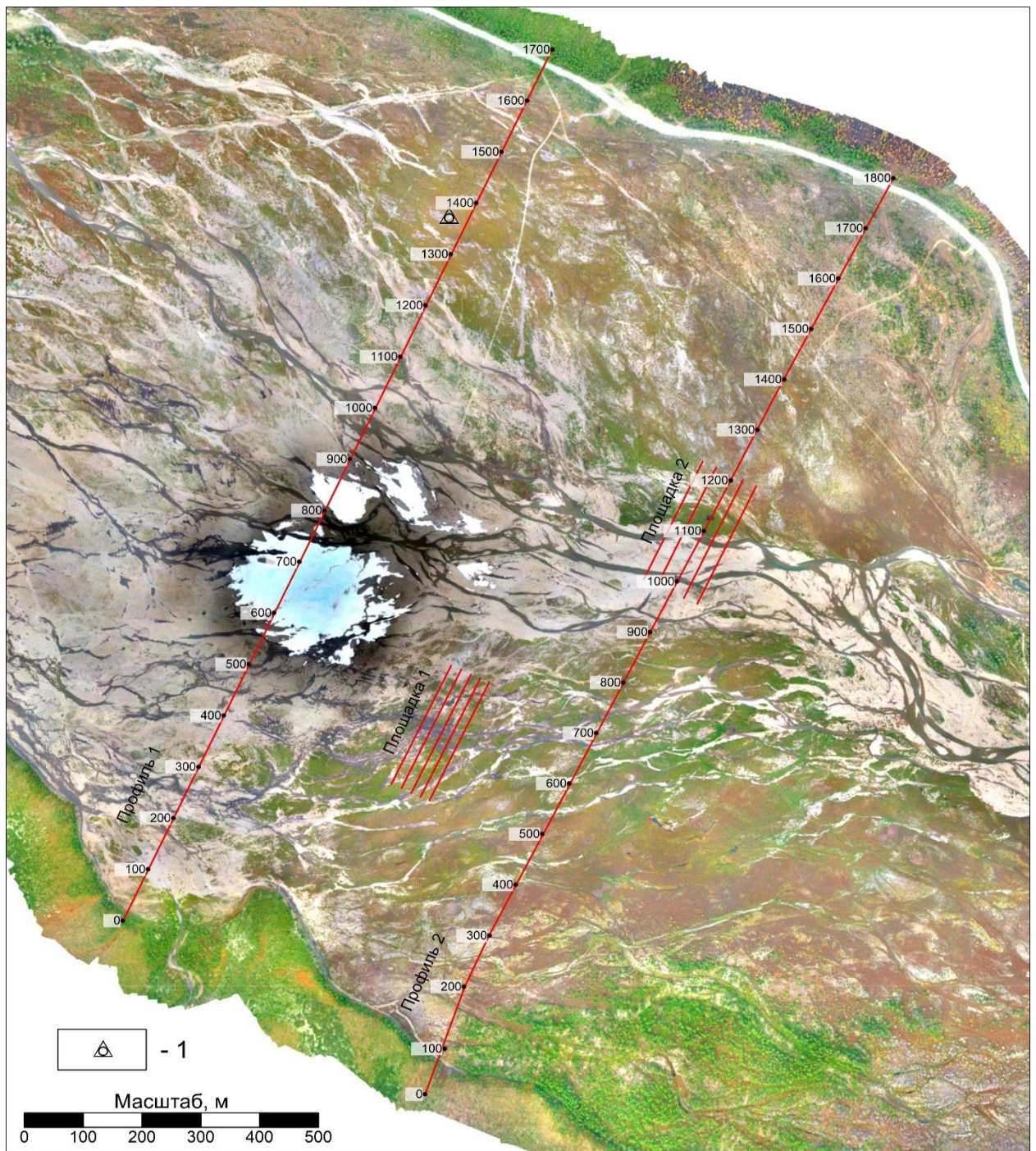


Рис. 1. Схема профилей электротомографии (ЭТ) на ортофотоплане наледной поляны от 15.08.2021.

1 – термометрическая скважина.

Fig. 1. The electrical resistivity tomography (ERT) survey lines at the orthophotoplan of the aufeis glade from August 15, 2021.

1 – the thermometric borehole.

Решение обратной задачи и построение 2-D и 3-D геоэлектрических моделей среды выполнялись с помощью программ Res2Dinvx64 и Res3Dinvx64 [Loke, 2014]. Двумерная инверсия проведена для объединённого набора данных трёхэлектродной и симметричной установок. Среднеквадратичная ошибка подбора модели на профиле №1 составила 8.1 % после трёх итераций, а на профиле №2 – 18.7 % после двух итераций. Повышенная погрешность подбора модели на профиле №2 объясняется повышенным шумом в исходных данных.

Трёхмерная инверсия выполнена для набора данных, полученных трёхэлектродной установкой. При этом среднеквадратичная ошибка подбора модели для площадки №1 после пяти итераций составила 11.6 %, а для площадки №2 после четырёх итераций – 17.9 %.

Применялся робастный способ инверсии с ограничением гладкости модели. Дополнительно использовался диагональный фильтр шероховатости метода наименьших квадратов с увеличенным весом, который позволяет уменьшить эффект горизонтальных и вертикальных структур и выявить геоэлектрические структуры более сложной формы. Кроме этого, использовался инструмент расширения диапазона фильтра шероховатости на две ячейки для того, чтобы уменьшить артефакты в виде полосчатых аномалий по направлениям x и y , которые возникают, когда расстояние между профилями превышает интервал между электродами более чем в два раза [Loke, 2018].

Следует отметить высокий уровень сопротивления заземлений (R_z), который достигал 10–30 кОм на участках галечника без растительности. Такое высокое и неравномерное R_z приводило к очень шумным данным, с большим количеством выбросов на кривых зондирования и графиках профилирования. Особенно шум проявлялся в тех зонах, где уровень кажущегося УЭС уменьшался до 100 Ом·м и ниже. Только после тщательной фильтрации выбросов данные подавались на вход программ инверсии.

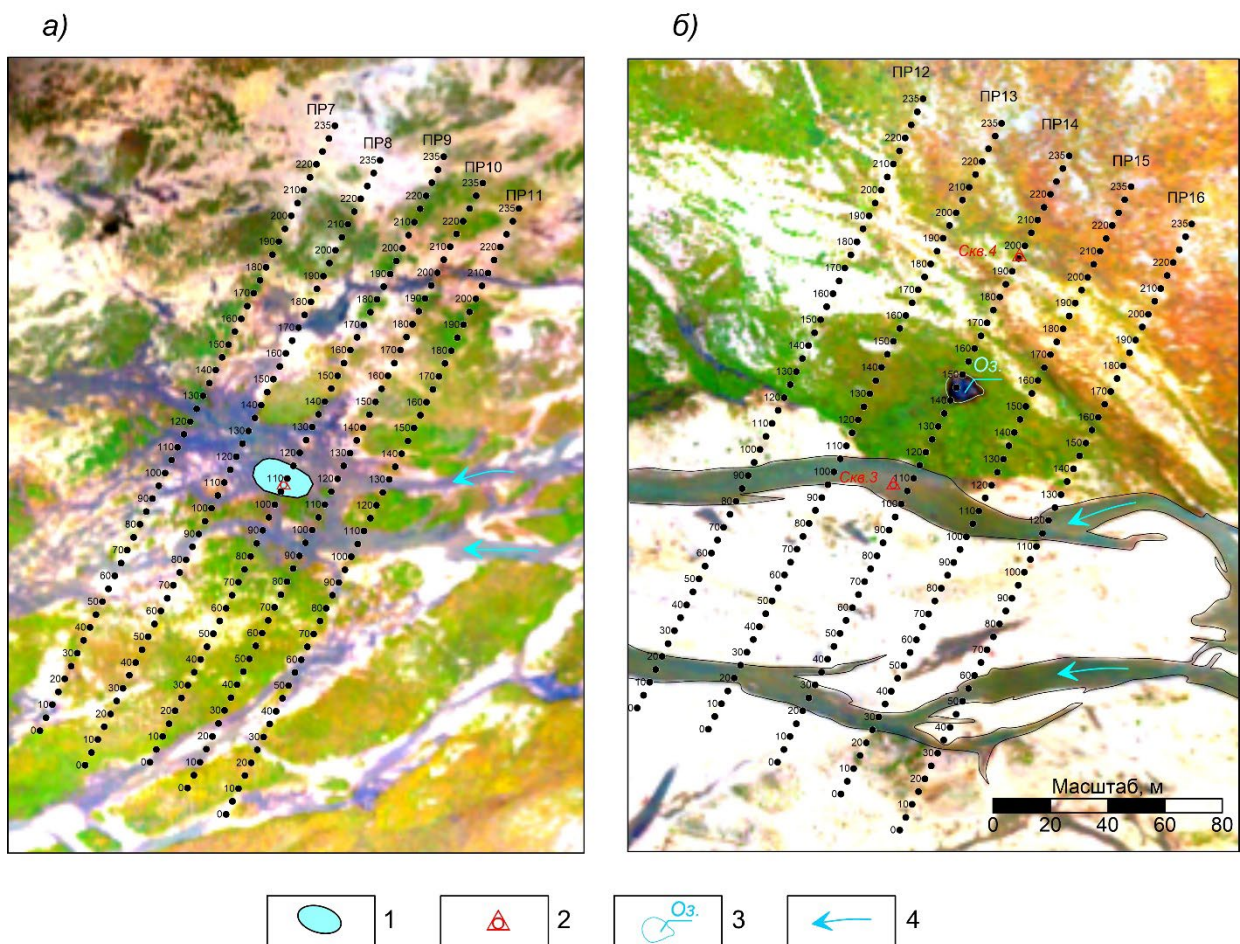


Рис. 2. Схема расположения профилей на площадках №1 (а) и №2 (б).

1 – граница образования зимнего ледяного бугра; 2 – скважина во льду; 3 – непересыхающее озеро; 4 – направление течения реки.

Fig. 2. The layout of the ERT survey lines of the site #1 (a) and site #2 (б).

1 – the boundary of the ice mound formed in winter; 2 – borehole in the ice; 3 – non-drying lake; 4 – the direction of the river flow.

4. Результаты исследований

4.1 Геоэлектрическое строение разрезов

Двумерная инверсия профильных данных ЭТ показала, что удельное электрическое сопротивление (УЭС) горных пород, слагающих разрез наледной поляны, изменяется в очень широком диапазоне – от первых десятков до десятков тысяч Ом·м (рис. 3). Такой широкий диапазон изменения УЭС объясняется разным литологическим составом пород, меняющейся влажностью, степенью трещиноватости, мёрзлым или талым состоянием.

Согласно геологической карте масштаба 1:200000, пойма р. Анмангында сложена четвертичными ледниковыми и аллювиальными песками и галечниками, а борта и основание долины представлены триасовыми песчано-глинистыми сланцами с пластами глинистых сланцев [Geological map, 1968]. Максимальным УЭС 10000–50000 Ом·м выделяются мёрзлые галечниковые с песчаным заполнителем отложения русловой фации аллювия. В талом состоянии эти породы имеют УЭС 1500–2500 Ом·м в зависимости от влажности, крупности гальки и количества заполнителя. Корытообразные аномалии высокого УЭС от палеорусел с русловой фацией аллювия типичны для геоэлектрических разрезов речных долин [Olenchenko et al., 2022].

Коренные породы имеют УЭС от 50 до 3000 Ом·м в зависимости от мёрзлого или талого состояния, степени трещиноватости и присутствия электропроводящих минералов (пирита), которые существенно понижают электросопротивление.

В месте, где на профиле № 2 зимой были вскрыты напорные воды (рис. 3, б), на геоэлектрическом разрезе выделяются области пониженных значений УЭС, вероятно маркирующие талики.

Границы между высокоомными мёрзлыми аллювиальными отложениями и подстилающими коренными породами достаточно контрастны. Однако толща коренных пород крайне неоднородна по электрическому строению. Обращают на себя внимание области очень низкого УЭС пород (50–150 Ом·м) в северо-восточном окончании профилей у правого берега р. Анмангында.

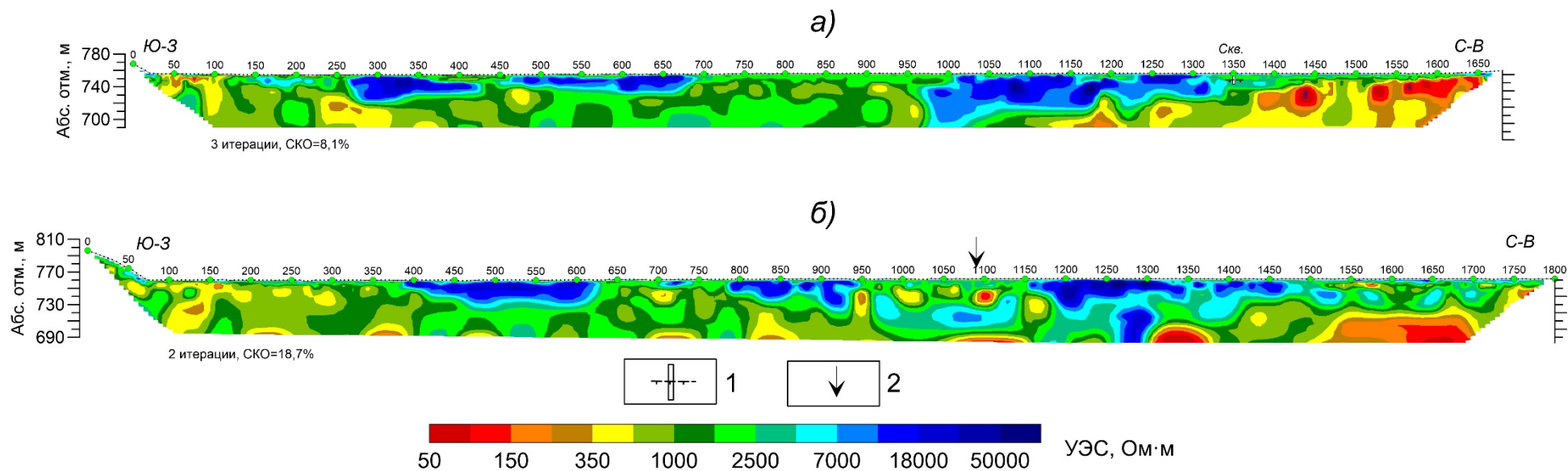


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы по профилям № 1 (а) и № 2 (б).

1 – термометрическая скважина и кровля ММП по данным термометрии; 2 – положение напорного источника, вскрытого скважиной в марте на профиле № 2.

Fig. 3. Geoelectric sections along the profile #1 (a) and #2 (б).

1 – the thermometric borehole and permafrost table according to the thermometric borehole data; 2 – the location of the confined groundwater spring discovered in March, 2022 at the profile #2.

4.2 Обоснование интерпретационных критериев

Предполагается, что УЭС сланцев менее 500 Ом·м соответствует их талому состоянию. Такой вывод основан на следующем. Сопоставление данных осенних зондирований ЭТ и зимней георадиолокации показало, что в интервале 150–250 м профиля № 2 у левого берега р. Анмангында глубина сезонного промерзания достигает пород с УЭС 300–500 Ом·м (рис. 4). Наличие этой отражающей границы на радарограмме в зимний период говорит о том, что ниже её породы находятся в талом состоянии. Это даёт основание считать, что песчано-глинистые сланцы с УЭС ниже 500 Ом·м находятся в талом состоянии. На этом же разрезе отчетливо видно, что перекрывающие талые рыхлые отложения русловой фации аллювия имеют высокое УЭС 1500–5000 Ом·м.

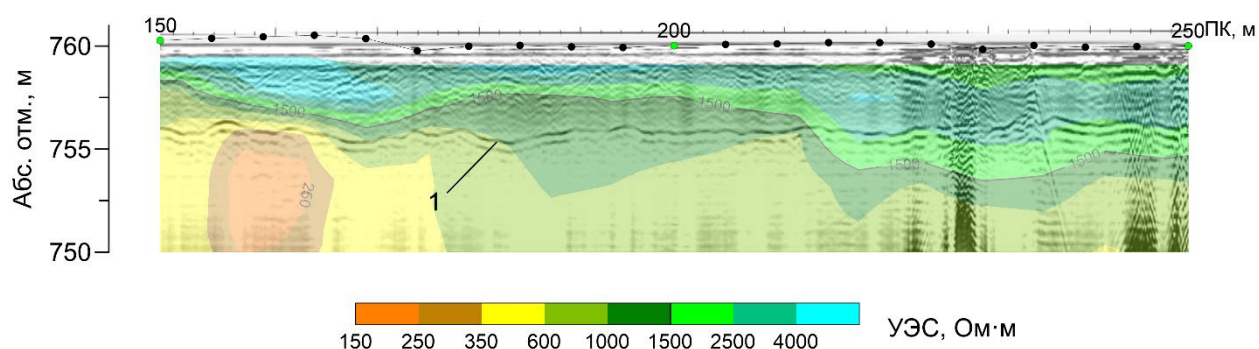


Рис. 4. Сопоставление «зимней» радарограммы и данных «осенней» электротомографии на профиле № 2 (см. рисунок 1) в интервале талых коренных пород.

1 – отражающая граница от подошвы сезонномёрзлого слоя.

Fig. 4. Comparison of ground penetrating radar (GPR) winter section and ERT autumn section at the profile #2 (see Fig. 1 for location) in the zone of unfrozen bedrock.

1 – reflecting boundary of the seasonally frozen layer base.

В случае сливающейся мерзлоты на радарограммах исчезает отражающая граница от подошвы слоя сезонного промерзания, что хорошо заметно на фрагменте разреза по профилю № 2 в интервале пикетов 900–950

м (рис. 5). Здесь, на высокой пойме многолетнемёрзлые породы залегают близко к поверхности. Поэтому в годовом цикле промерзания образуется сливающая мёрзлая толща, а отражающая граница на радарограмме исчезает. Эта граница проявляется в интервале пикетов 930–1000 м на участке низкой поймы, где летом галечниковые отложения и подстилающие коренные породы находятся в талом состоянии. При этом толща аллювия и трещиноватые породы плотика обводнены, а их УЭС составляет 600–2500 Ом·м.

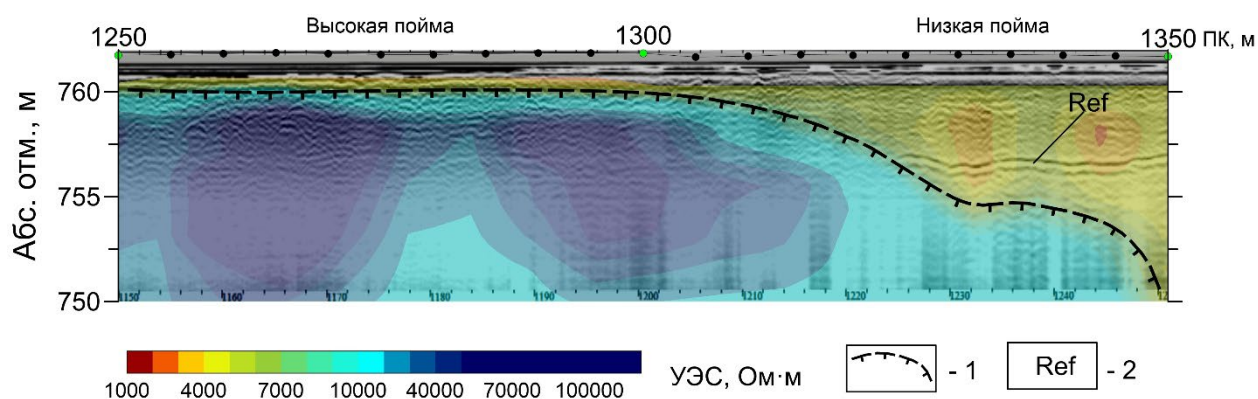


Рис. 5. Сопоставление «зимней» радарограммы и данных «осенней» электротомографии на профиле № 2 в интервале контакта мёрзлых и талых коренных пород.

1 – граница многолетнемёрзлых пород по данным ЭТ; 2 – отражающая граница на радарограмме от подошвы сезонно-мёрзлого слоя зимой.

Fig. 5. Comparison of ground penetrating radar (GPR) winter section and ERT autumn section at the profile #2 in the contact zone of frozen and unfrozen bedrock.

1 – boundary of permafrost by ERT data; 2 – reflecting boundary of the seasonally frozen layer base by GPR data.

Кроме сопоставления радарограмм и разрезов УЭС были проанализированы данные термометрии на момент зондирования методом ЭТ (рис. 6, а). Термометрическая скважина расположена в 30 м в стороне от профиля ЭТ, ниже по течению реки, а её проекция вынесена на разрез УЭС (рис. 6, б).

По данным термометрии кровля многолетнемерзлых пород залегает на глубине 8.6 м (абс. отм. 748 м), где температура переходит через 0 °С в отрицательные значения. Выше этой высотной отметки на графике температуры находится безградиентная зона мощностью 2 м с температурой плюс 0.2 °С. Мы полагаем, что таким образом на графике выделяется слой пород с надмерзлотными водами. УЭС обводненных пород в этом талике составляет 2000–2200 Ом·м, а у поверхности, в слое сухого галечника, УЭС возрастает до 3500–7000 Ом·м.

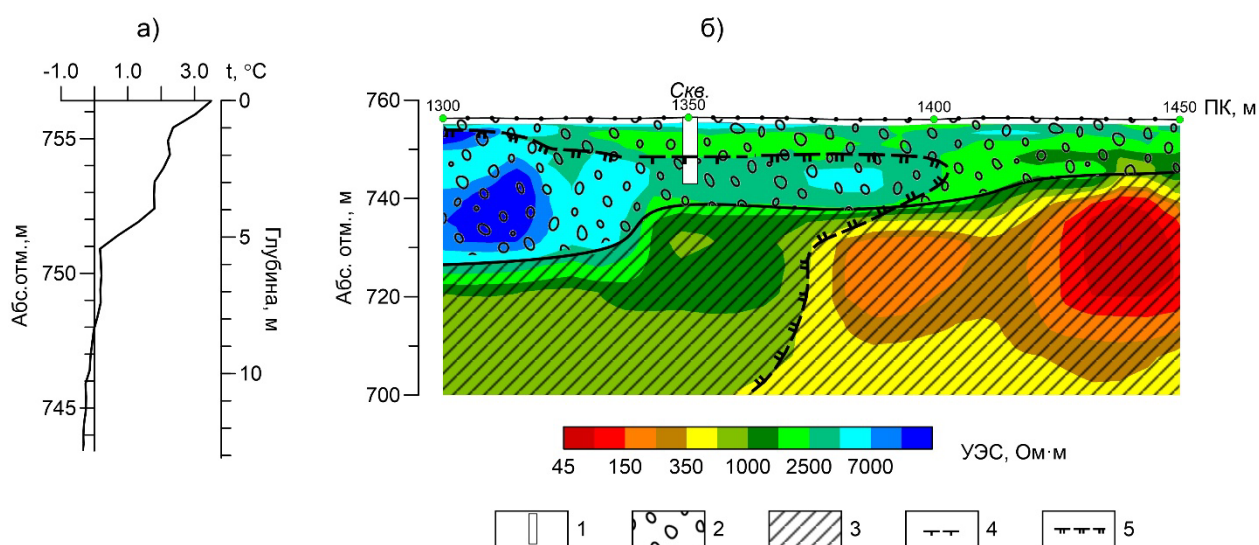


Рис. 6. Изменение температуры по данным скважинной термометрии 27.09.2022 (а) и фрагмент геоэлектрического разреза по профилю №1 по результатам 2-D инверсии (б) с элементами интерпретации.

1 – термометрическая скважина; 2 – галечник; 3 – сланцы; 4 – граница ММП по данным термометрии; 5 – граница ММП по данным ЭТ.

Fig. 6. Changes of ground temperature according to the data of thermometric borehole on September, 27 2022 (a) and fragment of the geoelectric section along profile # 1 based on the results of 2-D inversion (b) with interpretation elements.

1 – the thermometric borehole; 2 – alluvium; 3 – clay slate; 4 – permafrost table according to the thermometric borehole data; 5 – permafrost table according to ERT survey.

С глубины 8.6 м и до забоя скважины температура пород понижается до минус 0.25–0.35 °С при этом породы имеют УЭС 3600–3800 Ом·м.

При бурении скважина не вышла из аллювиальных отложений. Но на геоэлектрическом разрезе видно, что с абс. отм. 743 м (глубина 18 м) УЭС пород понижается до 700–1200 Ом·м, что мы интерпретируем как сланцы мёрзлые. В то же время в интервале профиля 1400–1450 м УЭС предполагаемых сланцев понижается до 150–400 с локальными аномалиями до 45 Ом·м. Вероятно эти сланцы сильно трещиноватые в зоне разлома и находятся в талом состоянии. Косвенным признаком талика у правого берега реки Анмангында в области окончания профиля № 1 являются заросли чозении, которые имеют значение биоиндикатора таликовых зон [Mikhailov, 2014].

Установленные по результатам 2-D инверсии электрические свойства пород наледной поляны сведены в Таблицу 1. При составлении таблицы также учитывались данные скважинной термометрии для оценки УЭС талых и мерзлых пород.

Таблица 1. Электрические свойства пород наледной поляны по результатам 2-D инверсии данных электротомографии

Table 1. Electrical resistivity values of sediments of the aufeis glade according to the 2-D inversion of ERT data

Наименование пород	УЭС, Ом·м
Галечник талый маловлажный	3500–7000
Галечник талый, обводнённый	1500–4000
Галечник мёрзлый	3500–50000
Сланцы мёрзлые	500–3000
Сланцы талые	300–700
Сланцы интенсивно трещиноватые, талые или пиритизированные (?)	<50–200

Как следует из Таблицы 1 диапазон УЭС разных пород перекрывается, что затрудняет однозначную геологическую интерпретацию. Сухие галечники имеют такое же высокое УЭС, как и мёрзлые, однако они залегают в приповерхностной части разреза и поэтому однозначно выделяются. Песчано-глинистые сланцы обладают очень широким диапазоном изменения УЭС, при этом в зависимости от степени трещиноватости или пиритизации величина УЭС у мёрзлых и талых сланцев может быть близка по значениям.

4.3 Геологическая интерпретация

Согласно установленным критериям и априорной информации о геологическом строении района работ была выполнена интерпретация геоэлектрических разрезов (рис. 7).

В пойме реки кровля многолетнемёрзлых пород выделяется на глубинах от 2 м на участках высокой поймы до 30 м в подрусловых таликах.

Крутопадающие зоны пониженного УЭС интерпретируются нами как зоны дробления, и мы предполагаем, что вдоль некоторых из них развиты гидрогеогенные талики. Однако это предположение требует заверки бурением.

В северо-восточном окончании профилей коренные породы имеют низкое УЭС, что интерпретируется как их талое состояние. По данным термометрической скважины в сентябре кровля ММП залегала с глубины около 8.5–10 м. Такое глубокое залегание кровли ММП связано с надмерзлотными водами, вскрытыми при бурении. На разрезе УЭС хорошо заметно, что слой пород высокого электросопротивления (мёрзлые породы), вскрытый скважиной, выклинивается в направлении от скважины к правому берегу. Здесь же в пойме реки отмечаются заросли чозении, указывающие на талик. Следовательно, предположение о наличии талика в правобережье, сделанное на основе данных электротомографии, подтверждается и биологическим индикатором талых зон.

Границы многолетнемёрзлых пород в пойме реки имеют сложную форму. При этом выделяются как неглубокие, до 10 м, талики в аллювиальных отложениях, так и широкие глубокие талые зоны в пределах сети основных крупных проток р. Анмангында. Такие талики предполагаются нами на профиле №1 между пикетами 700 и 1000 м и на профиле №2 между пикетами 950 и 1150 м.

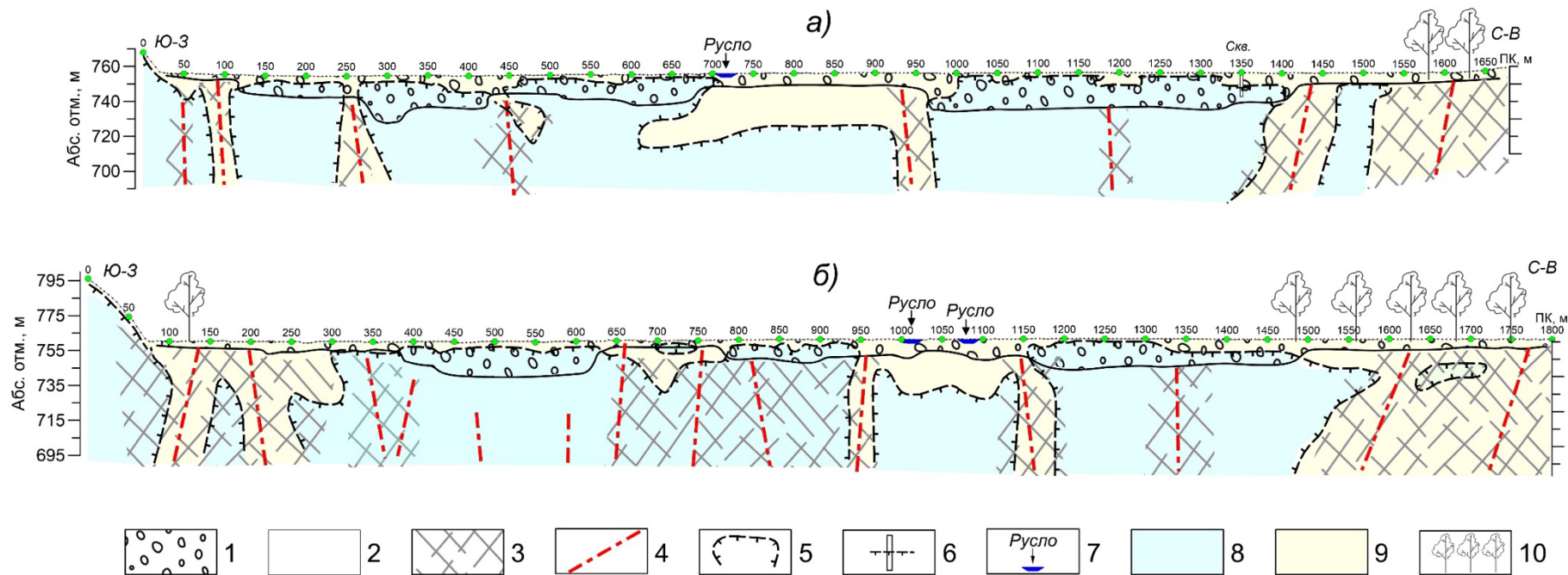


Рис. 7. Интерпретация геоэлектрических разрезов по профилю № 1 (а) и № 2 (б).

1 – русловой аллювий; 2 – сланцы; 3 – зоны трещиноватости; 4 – разломы; 5 – граница ММП; 6 – термометрическая скважина и кровля ММП по данным термометрии; 7 – положение основных русел (глубина вне масштаба); 8 – мёрзлые породы; 9 – талые породы; 10 – заросли чозении.

Fig. 7. Interpretation of geoelectrical sections along the profile #1 (a) and #2 (б).

1 – alluvium; 2 – clay slate; 3 – zone of fractured rock; 4 – fault; 5 – permafrost table; 6 – permafrost table according to the thermometric borehole data; 7 – the location of main river channels (depth out of scale); 8 – frozen sediments; 9 – unfrozen sediments; 10 – groves of Chosenia.

4.4 Анализ трёхмерных геоэлектрических моделей

Исследования на площадке № 1 в области развития наледного бугра, показали, что бугор развивается над подрусловым таликом, который отчетливо проявляется на трёхмерной геоэлектрической модели областью пониженного УЭС трубообразной формы (рис. 8). Кроме этого, в разрезе модели выделяются узкие вертикальные аномалии низкого (до 300 Ом·м) УЭС, которые мы связываем с разломными зонами в песчано-глинистых сланцах. Мерзлые аллювиальные отложения оконтуриваются по высокому УЭС от 3500 до 26000 Ом·м.

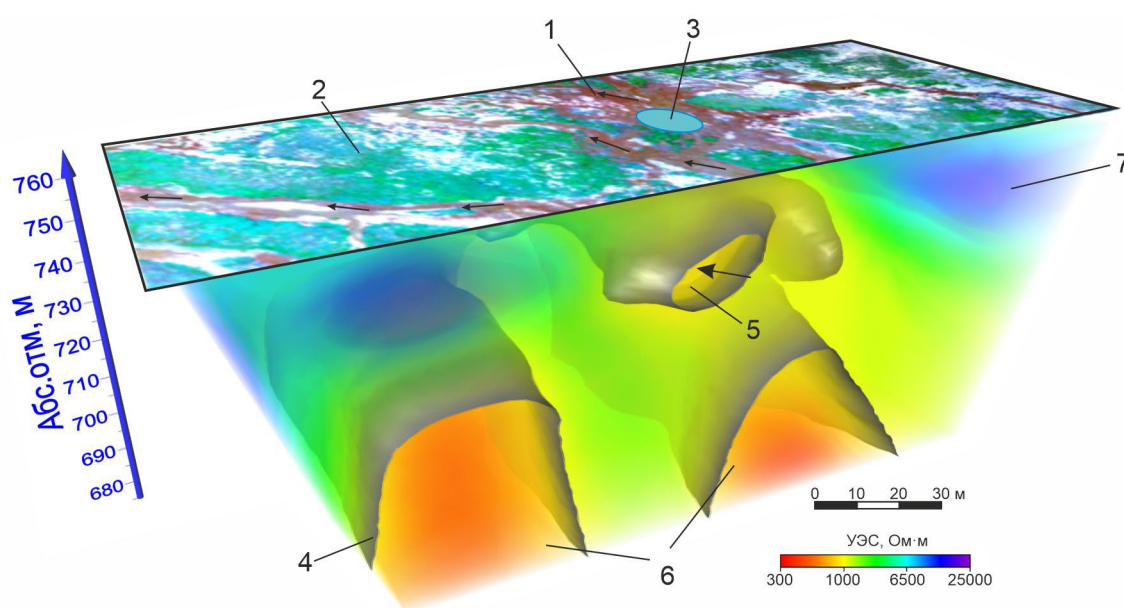


Рис. 8. Ортофотоплан поверхности и общий вид трехмерной геоэлектрической модели площадки №1.

1 – русло; 2 – низкая пойма; 3 – участок образования наледного бугра; 4 – изоповерхность УЭС 1300 Ом·м; 5 – канал фильтрации; 6 – зоны разломов; 7 – многолетнемёрзлые породы. Стрелками показано направление движения воды.

Fig. 8. Orthophotoplan and 3-D geoelectric model of the site #1.

1 – river channel; 2 – low floodplain; 3 – section of ice mound formation; 4 – surface of electrical resistivity 1300 $\Omega \cdot \text{m}$; 5 – channel of groundwater discharge; 6 – fault zone; 7 – permafrost. The arrows indicate the direction of water flow.

В разрезе трёхмерной модели по профилю № 9 через участок образования наледного бугра видно, что бугор образуется над низкоомными породами (подрусловым таликом), а на глубину прослеживается вертикальная зона низкого УЭС, интерпретируемая как разлом, по которому вероятно поступают глубинные воды (рис. 9, а).

Сопоставление «зимней» радарограммы и фрагмента разреза УЭС пород в период максимального оттаивания показало, что ниже отражающей границы от подошвы сезонномёрзлого слоя находятся талые породы с УЭС 420–1500 Ом·м (рис. 9, б). Над каналами фильтрации глубина сезонного промерзания минимальна, а сами каналы выделяются по пониженному УЭС пород (ПК110, ПК 125).

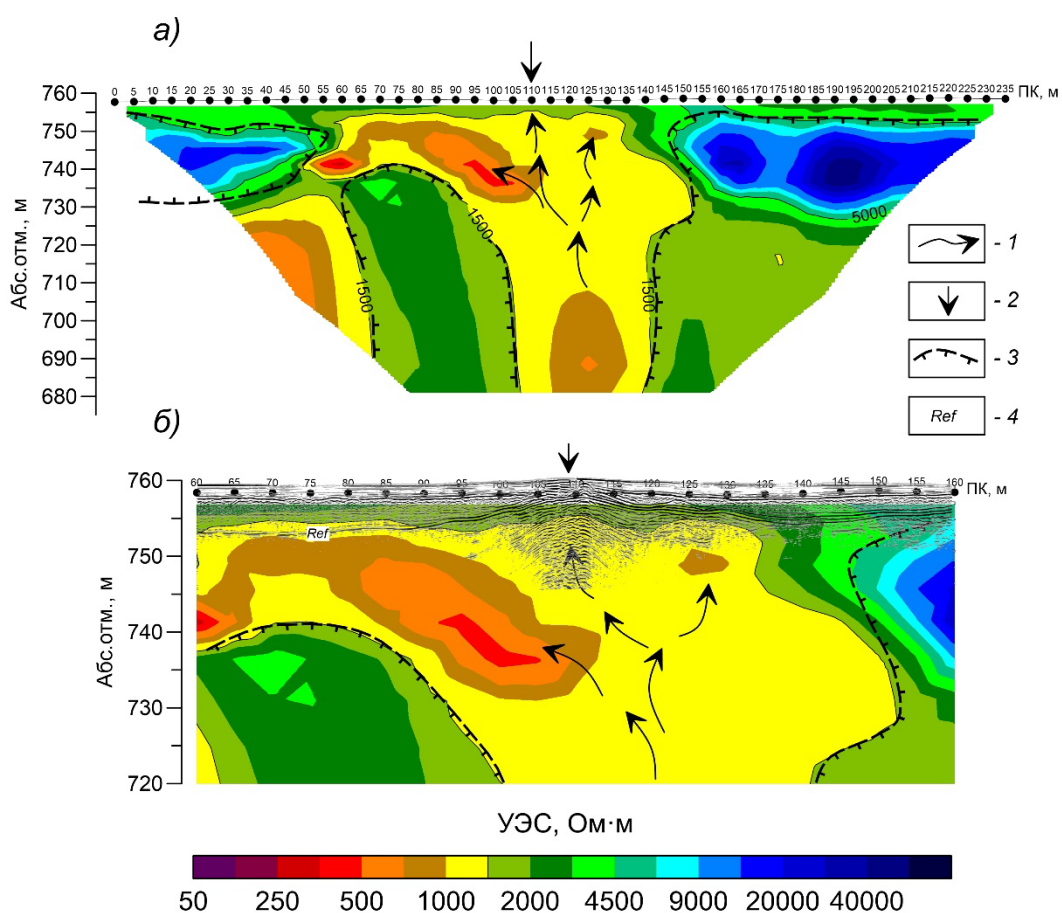


Рис. 9. Вертикальный срез 3D модели по профилю №9 через участок образования наледного бугра (а) и увеличенный фрагмент разреза с «зимней» радарограммой (б).

1 – предполагаемое направление движения воды; 2 – место выхода воды на наледь; 3 – предполагаемая граница ММП; 4 – отражающая граница от подошвы сезонно-мёрзлого слоя в зимний период.

Fig. 9. Vertical slice of 3-D model of the profile #9 through the section of ice mound formation (a) and increased fragment of GPR winter section (б).

1 – estimated direction of water flow; 2 – location of water spilling over ice; 3 – estimated permafrost etable; 4 – reflecting border of the lower boundary of the seasonally frozen layer in winter.

На площадке №2 по данным «зимней» георадиолокации по характерным гиперболам дифракции (рис. 10) был выявлен и вскрыт скважиной источник напорных подземных вод. Однако на момент исследований оставалось не ясным – разгружаются воды из подруслового талика в аллювии или представляют собой трещино-жильные воды разлома.

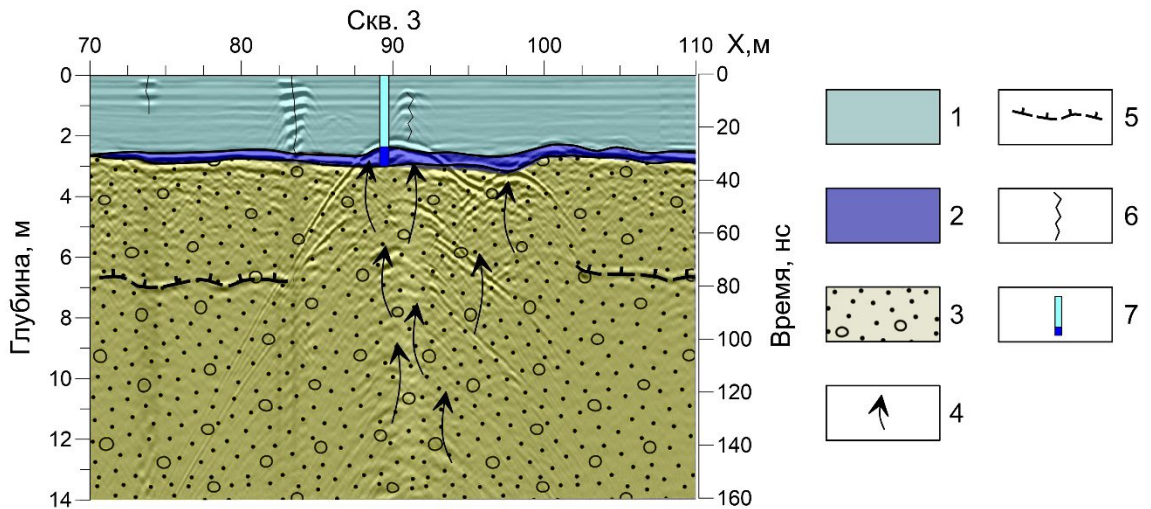


Рис. 10. Фрагмент «зимней» радарограммы (250 МГц) через участок разгрузки подземных вод на площадке № 2 с элементами интерпретации: 1 – лёд; 2 – вода; 3 – аллювий; 4 – восходящий поток воды; 5 – подошва слоя сезонного промерзания; 6 – трещина; 7 – скважина.

Fig. 10. The fragment of winter GPR section (250 MHz) through the zone of groundwater discharge at the profile site #2 accompanied by its interpretation: 1 – ice; 2 – water; 3 – alluvium; 4 – ascending water flow; 5 – base of the seasonal freezing layer; 6 – cracks; 7 – borehole.

В трёхмерной геоэлектрической модели площадки №2 в разрезе под низкой поймой прослеживается область пониженного УЭС трубообразной формы, интерпретируемая как канал фильтрации подземных вод в трещиноватых сланцах (рис. 11, а) в подрусловом талике. На участке высокой поймы в разрезе модели выделяется субвертикальная аномалия очень низкого (около 100 Ом·м) УЭС, которую мы объясняем зоной дробления. Многолетнемёрзлые породы высокой поймы имеют УЭС, достигающее десятков тысяч Ом·м.

Срез трёхмерной модели по диагонали позволяет увидеть связь глубинной низкоомной разломной зоны с трубообразной аномалией в верхней части разреза (рис. 11, б), что дает основание предположить дополнительное питание вод подрусловых таликов трещино-жильными водами разлома.

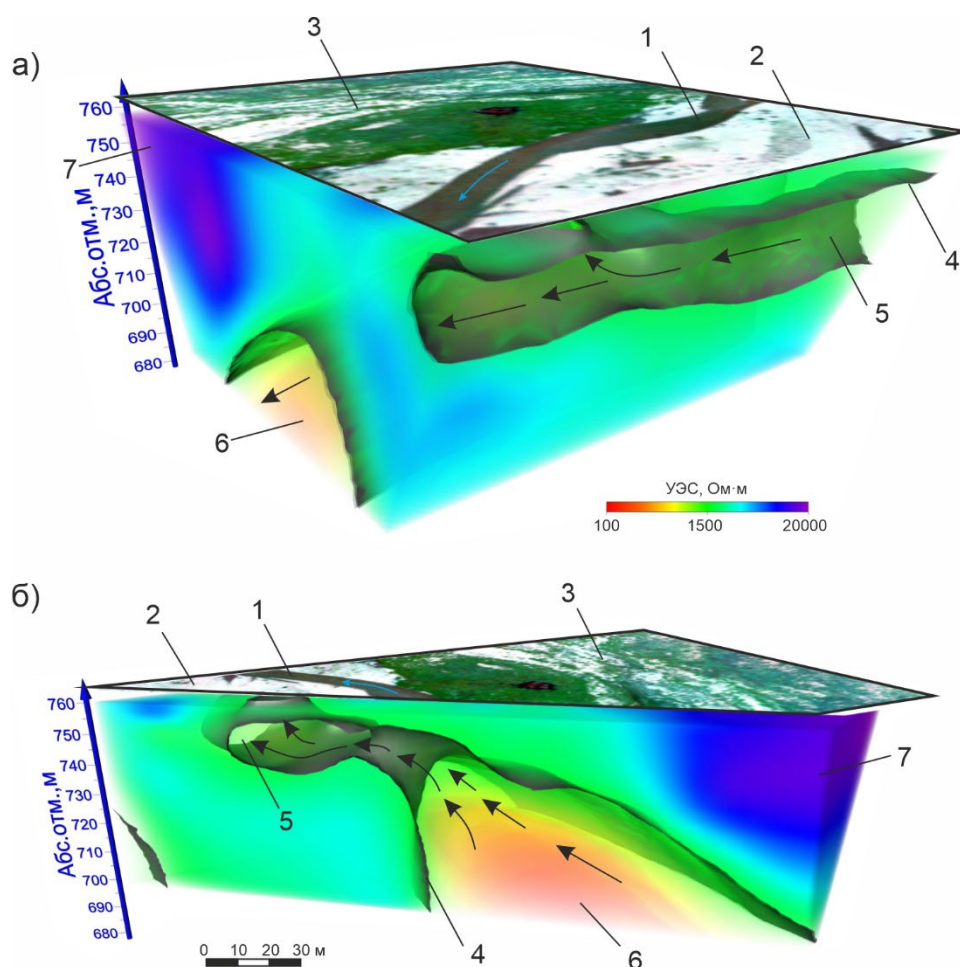


Рис. 11. Ортофотоплан поверхности и срез трехмерной геоэлектрической модели площадки №2.

1 – русло; 2 – низкая пойма; 3 – высокая пойма; 4 – изоповерхность УЭС 1500 Ом·м; 5 – канал фильтрации; 6 – зона разлома; 7 – многолетнемёрзлые породы. Стрелками показано направление движения воды.

Fig. 11. Orthophotoplan and slice of 3-D geoelectric model of the site #2.

1 – river channel; 2 – low floodplain; 3 – high floodplain; 4 – surface of electrical resistivity 1500 $\Omega \cdot m$; 5 – channel of groundwater discharge; 6 – fault zone; 7 – permafrost. The arrows indicate the direction of water flow.

На вертикальном разрезе трёхмерной модели УЭС по профилю №14 через скважину, вскрывшей напорные воды, видно (рис. 12, *a*), что на участке низкой поймы в интервале 0–115 м в верхней части разреза до глубины 20 м (абс. отм. 740–756 м) выделяются изометричные области пониженного УЭС, которые мы связываем с каналами фильтрации в подрусловом талике. В тоже время от интенсивной вертикальной аномалии низкого (75–200 Ом·м) УЭС на глубине, которая интерпретируется как разлом, прослеживаются связи с приповерхностными аномалиями УЭС в подрусловом талике.

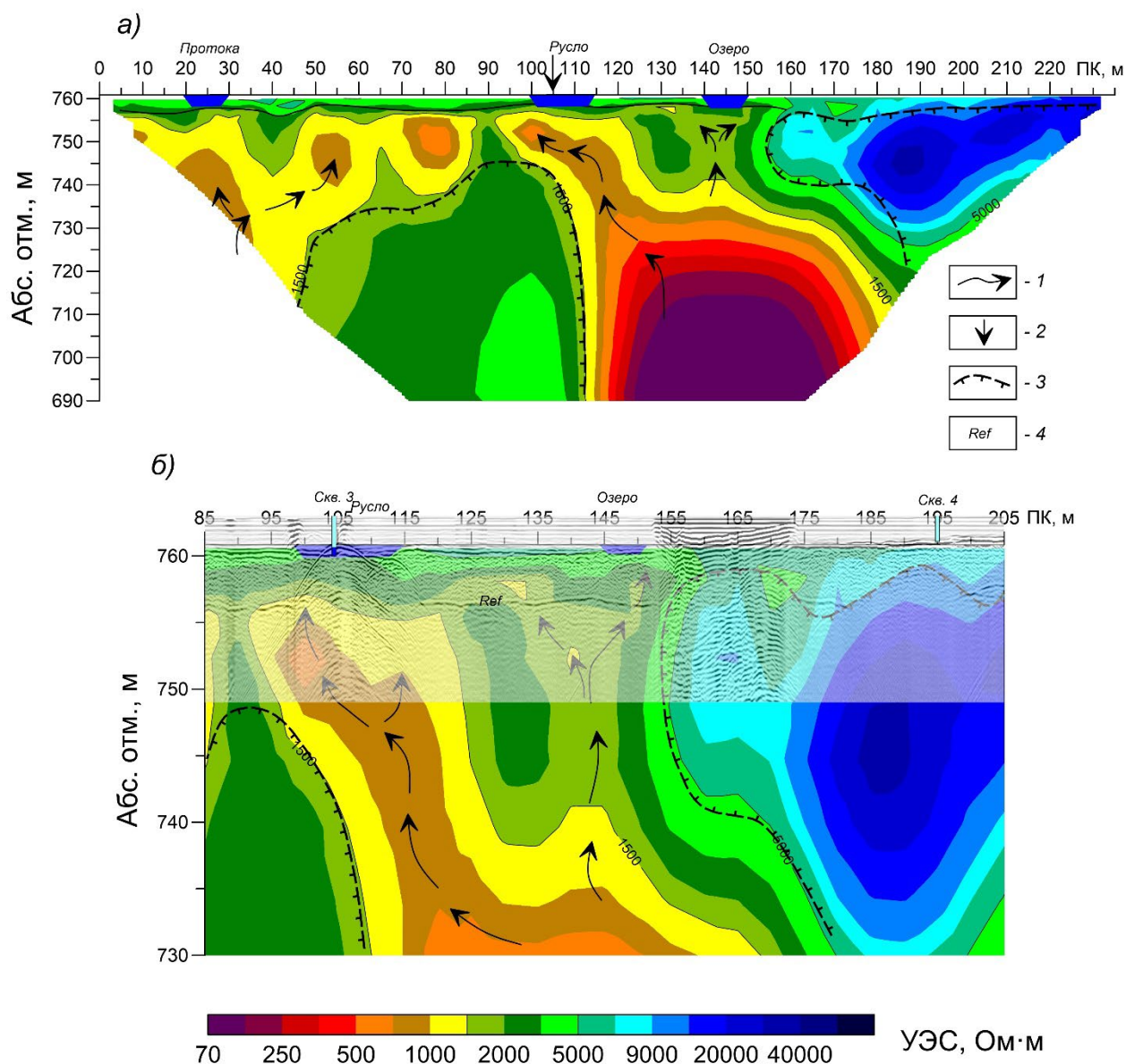


Рис. 12. Вертикальный срез 3D модели площадки № 2 по профилю №14 (а) и увеличенный фрагмент разреза с «зимней» радарограммой (б).

1 – предполагаемое направление движения воды; 2 – место бурения скв.3; 3 – предполагаемая граница ММП; 4 – отражающая граница от подошвы сезонномёрзлого слоя в зимний период.

Fig. 12. Vertical slice of 3-D model of the site #2 along profile # 14 through the section of ice mound formation (а) and increased fragment of winter GPR section (б).

1 – estimated direction of water flow; 2 – location of the borehole #3; 3 – estimated permafrost table; 4 – reflecting border of the lower boundary of the seasonally frozen layer in winter.

На увеличенном фрагменте разреза с наложенной «зимней» радарограммой показаны вертикальные зоны пониженного УЭС, по которым, по нашему мнению, поступает вода из разлома в подрусловой талик (рис. 12, б). Отражающая граница от подошвы сезонномёрзлого слоя на «зимней» радарограмме означает талое состояние пород ниже этой границы. В области высокого УЭС пород отражающая граница пропадает, что означает сливающийся тип многолетнемёрзлой толщи.

Примечательно, что к небольшому озеру (пикеты 140–150 м, см. рис. 2) также прослеживаются низкоомные подводящие каналы (рис. 12, б). Это маленькое озеро существует постоянно, независимо от уровня воды в реке, а зимой на его месте растёт ледяной бугор пучения. Результаты электротомографии показывают, что не исключён механизм питания этого озера трещинно-жильными водами.

5. Обсуждение результатов

Механизм питания наледи р. Анмангында водами подруслового талика не вызывает вопросов. На геоэлектрических разрезах через наледную поляну выявлены достаточно глубокие (до 30 м) области пониженного УЭС в пределах низкой поймы с основным руслом. Многочисленные мелкие протоки высокой поймы располагаются над относительно неглубокозалегающей мерзлотой 1.5–2.5 м. Под более крупными протоками кровля ММП определяется на глубине около 6 м. При средней глубине сезонного промерзания 4.5 м, установленной по данным ГРЛ [Zemlianskova et al., 2023 (in print)], источником наледных вод являются подрусловые талики под крупными протоками. Вода таликов находится как в аллювиальных отложениях, так и в зоне экзогенной трещиноватости песчано-глинистых сланцев. Известно, что обводнённая зона трещиноватости коренных пород в пойме р. Детрин, притоком которого является р. Анмангында, используется для водоснабжения поселка Усть-Омчуг [Geological map, 1968].

Большинство наледей на территории Северо-Востока России расположено в областях молодого контрастного рельефа с восходящим неотектоническим движением и тектоническими разломами [Tolstikhin, 1974], что косвенно подтверждает расположение рек с постоянным зимним стоком на территориях с повышенной тектонической трещиноватостью. Считается, что влияние тектонических разломов на режим и зимний сток является азональным определяющим фактором по сравнению с влиянием климатических и криогенных факторов, а новейшие и омоложенные разломы – единственные водоносные тракты, по которым происходит разгрузка подмерзлотных вод в реки [Tolstikhin, 1974].

В ходе исследования важно было установить, имеется ли связь областей разгрузок наледных вод с разломами и гидрогеогенными напорно-фильтрационными таликами. Геоэлектрическими признаками разломных зон являются крутопадающие зоны пониженного или аномально низкого УЭС. Такие признаки были установлены на геоэлектрических разрезах долины р. Анмангында, а также на локальных участках с источниками разгрузки подземных вод из аллювиальных отложений. Вдоль правого берега р. Анмангында выявлена широкая зона низкого УЭС в коренных породах на всю глубину зондирования (60 – 80 м). Здесь же на поверхности произрастают заросли чозении, которые являются индикаторами пойменных гидрогенных таликов [Mikhailov, 2014].

Согласно архивным геофизическим данным [Solovieva, 1967], выше наледи под высокоомным слоем относительно небольшой мощности залегают породы с УЭС менее 100 Ом·м, а в некоторых местах и менее 30 Ом·м. Наши предыдущие исследования методом зондирования становления поля (ЗСБ) подтверждают эти результаты – непосредственно под наледью породы имеют УЭС более 1000 Ом·м на глубину около 350 м, а выше наледи по течению реки примерно в 400 м от края наледи УЭС пород составляет 55–150 Ом·м на протяжении 800 м [Potapov et al., 2022]. По данным метода ЗСБ на разрезе через долину р. Анмангында в месте впадения р. Солонцовый (он же

Слипцовый) породы с глубины 40 – 60 м до 350 м имеют УЭС 50 – 150 Ом·м, что указывает на их талое состояние (если исключить влияние пиритизации на электрическое сопротивление пород). В этом же месте по геологическим данным находится узел пересечения разломов, один из которых сечёт долину р. Анмангында поперёк, а другой под углом 30–35° относительно первого [Букаев, 1969]. В узле разломов расположен постоянно действующий незамерзающий источник. Н.А. Букаев отмечал, что косвенным доказательством наличия источника подмерзлотных вод являются белые налёты солей, остающиеся на галечниках после таяния льда, а малая минерализация воды в источнике (20–30 мг/л) объясняется смешиванием глубинных и надмерзлотных вод, а также слабым выщелачиванием коренных пород [Букаев, 1969]. Последующий спектральный анализ показал, что белый налёт — это двуокись кремния SiO₂ [Lebedev and Ipatieva, 1980], что является неубедительным аргументом в пользу глубинного источника воды. По мнению В.М. Лебедева, питание наледи р. Анмангында осуществляется за счёт аллювиальных вод, дебит которых уменьшается к весне [Lebedev, Ipatieva, 1980]. В.М. Михайлов считает, что «...в долине р. Анмангында на большом ее протяжении, движется единый мощный поток подземных вод, скорость которого постепенно убывает с глубиной по мере уменьшения трещиноватости коренных пород. С одной стороны, это обуславливает свободный вертикальный водообмен в каждом поперечном сечении, хорошую промытость скальных пород, большие запасы и низкую минерализацию подземных; с другой, замедленная водоотдача в нижней части профиля обеспечивает подпитку аллювиального водоносного горизонта в течение всей зимы» [Mikhailov, 2001].

Данные электротомографии подтверждают, что в долине р. Анмангында в границах наледной поляны существуют талики глубиной до 30 м, но только под крупными протоками, а анализ трёхмерных моделей показал, что наряду с горизонтальными каналами фильтрации трещинно-пластовых вод в зоне экзогенной трещиноватости, существуют геоэлектрические признаки

трещинно-жильных вод разломных зон. Такой обводнённый разлом горизонтальной мощности не менее 250 м предполагается вдоль правого борта долины, где на поверхности растёт чозенивая роца.

Мы полагаем, что разломы меньших размеров, чем те, в узле которых сформировался крупный сквозной талик, являются дополнительными путями транзита подземных вод в долине реки Анмангынды наряду с аллювиальным водоносным горизонтом и зоной экзогенной трещиноватости коренных пород. Из этих же разломов происходит разгрузка подземных вод в аллювиальный водоносный горизонт. Эти выводы основаны на том, что и в месте формирования ледяных бугров, и на участке выявленного напорного источника на геоэлектрических разрезах прослеживаются линейные субвертикальные зоны низкого удельного электрического сопротивления, имеющие связь с аномалиями УЭС от каналов фильтрации в толще аллювия.

6. Выводы

В результате электроразведочных исследований в пределах наледной поляны р. Анмангынды установлены следующие геокриологические условия формирования гигантской наледи.

В пойме реки в пределах основных протоков установлены геофизические признаки подрусловых таликов глубиной до 30 м с каналами фильтрации, над которыми в зимнее время в местах выхода напорных подземных вод формируются ледяные бугры. Горизонтальные каналы фильтрации выделяются на разрезах УЭС по результатам 2-D инверсии локальными аномалиями пониженного электросопротивления квазиизометричной формы. В подрусловых таликах выделяются трубообразные аномалии пониженного УЭС, интерпретируемые как каналы фильтрации в аллювии и зоне экзогенной трещиноватости. Примечательно, что в местах разгрузки подземных вод на лёд прослеживаются сквозные аномалии пониженного УЭС от предполагаемых крутопадающих разломов к горизонтальным каналам

фильтрации. Мы считаем, что таким образом подрусловые талики подпитываются трещино-жильными водами узких разломных зон.

В правобережье долины установлены геоэлектрические признаки глубоких таликов, предположительно связанных с разломной тектоникой. Косвенным признаком талика также является чозениевая роща в правобережной части долины.

Вероятно, наряду с аллювиальным водоносным горизонтом и зоной экзогенной трещиноватости коренных пород путями транзита и разгрузки в вышележащие слои являются узкие разломные зоны, по которым образовалась долина р. Анмангында.

Несмотря на то, что в пределах выявленных подрусловых таликов установлены и крутопадающие зоны пониженного УЭС, интерпретируемые как разломы, вопрос о их роли в питании наледи глубинными водами остается открытым до тех пор, пока полученные нами геофизические данные не будут заверены бурением.

Полученные данные являются уникальными с точки зрения фактической информации о строении наледной поляны гигантской наледи подземных вод. Они позволяют расширить представления о процессах взаимодействия геологических, геокриологических и гидрогеологических факторов в процессах наледообразования, что с практической точки зрения актуально для разработки методов прогноза и мер адаптации хозяйственной деятельности к опасным наледным явлениям. Дальнейшие исследования будут направлены на выявление сверхглубоких подрусловых таликов, питающих наледи в узлах пересечений тектонических нарушений.

7. Заявленный вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

8. Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

9. Литература / References

Букаев Н.А. Основные закономерности режима гигантских наледей в верховьях р. Колымы (на примере Анмангындинской наледи) // Наледи Сибири. М.: Наука, 1969. No 4. С. 62–78.

Геологическая карта СССР масштаба 1:200000. Серия Верхне-Колымская. Лист Р-55-XXX. Объяснительная записка. М.: Недра, 1968. 67 с.

Землянскова А.А., Алексеев В.Р., Шихов А.Н., Осташов А.А., Нестерова Н.В., Макарьева О.М. Многолетняя динамика гигантской Анмангындинской наледи на Северо-Востоке России (1962–2021 гг.) // Лёд и Снег. 2023а. Т. 63 №1. С. 71–84. <https://doi.org/10.31857/S2076673423010167>

Землянскова А.А., Оленченко В.В., Макарьева О.М. Особенности сезонного промерзания пород наледной поляны в долине р. Анмангында (Магаданская область) по данным георадиолокации // Георадар 2023, г. Москва, 2023 (в печати)

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

Калабин А. И. Источники и наледи подземных вод на Северо-Востоке СССР // Труды ВНИИ–1. Мерзлотоведение. Магадан: ВНИИ-1, 1957. Разд. 1. Вып. 7. С. 10–32.

Лебедев В.М., Ипатьева А.И. Анмангындинская наледь, ее режим и роль в водном балансе речного бассейна // Труды ДВНИГМИ. 84. Гидрологические исследования и прогнозы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1980. С. 86-93.

Михайлов В.М. Географические закономерности распространения пойменных таликов // Известия Российской академии наук. Серия

географическая, 2014. №1. С. 65–74. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2014-1-65-74>

Михайлов В.М. Сквозные талики в долинах малых рек // Колыма, 2001. №4. С. 31–34.

Отчет по результатам воднобалансовых исследований с наледной составляющей в бассейне р. Анманданды. Магадан: Изд-во Колымское управление гидрометеорологической службы, 1977 г. 62 с.

Потапов В.В., Макарьева О.М., Оленченко В.В. Геоэлектрическое строение разреза на Анмангындинской наледи (Магаданская область) по данным метода ЗСБ // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2022. Т. 2. №. 3. С. 59–65.

Романовский Н.Н. О геологической деятельности наледей // Мерзлотные исследования. 1973. Вып. XIII. С. 66–89.

Соловьева Г.В. Наледное регулирование подземного стока в районах широкого развития многолетнемерзлых пород: Окончательный отчет. М., 1967. Т. 1. 447 с.

Толстихин О.Н. Наледи и подземные воды северо-востока СССР. Новосибирск: Изд-во Наука, 1974. 164 с.

Alekseyev V.R., 2015. Cryogenesis and geodynamics of icing valleys. *Geodynamics & Tectonophysics*. 6(2). 171–224. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-2-0177>

Kneisel Ch., Hauck Ch., Fortier R., Moorman B., 2008. Advances in Geophysical methods of permafrost investigations. *Permafrost and Periglacial Processes*. 19(2), 157-178. 10.1002/ppp.616.

Liu W., Fortier R., Molson J., Lemieux J-M., 2021. 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* 32 (3), 468–483. .

Loke M.H., 2014. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Geotomo Software, Malaysia, 216 p.

Loke M.H., 2018. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. (Copyright 1996–2018) Part 8, pp. 127–178. Web: www.geotomosoft.com

Makarieva O.M., Nesterova N.V., Ostashov A.A., Zemlyanskova A.A., Tumskoy V.E., Gagarin L.A., Ekaykin A.A., Shikhov A.N., Olenchenko V.V., Khristoforov I.I., 2021. Perspectives of the Development of Complex Interdisciplinary Hydrological and Geocryological Research in the North-East of Russia. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences* 66 (1), 74–90. doi: 10.21638/spbu07.2021.105.

Olenchenko V.V., Osipova P.S., 2022. Electrical Resistivity Tomography of Alluvial Deposits during Prospecting for Placer Gold. *Russian Geology and Geophysics* 63, 98–108. 10.2113/RGG20204203.

Olenchenko V.V., Makarieva O.M., Zemlianskova A.A., Danilov K.P., Ostashov A.A., Kalganov A.S., Nesterova N.V., Khristoforov I.I., 2023. Geophysical indicators of aufeis in the Anmangynda river (Magadan region). *Geodynamics & Tectonophysics* 14(3):0702. (in Russian) <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-3-0702>

Walther M., Batsaikhan V., Dashtseren A., Jambaljav Y., Temujin Kh., Ulanbayar G., Kamp U., 2021. The formation of aufeis and its impact on infrastructure around Ulaanbaatar, North-Central Mongolia. *Erforschung biologischer Ressourcen der Mongolei. Exploration into the Biological Resources of Mongolia*, ISSN 0440–1298, 265. <https://digitalcommons.unl.edu/biolmongol/265>

Zemlianskova A., Makarieva O., Shikhov A., Alekseev V., Nesterova N., Ostashov A., 2023b. The impact of climate change on seasonal glaciation in the mountainous permafrost of North-Eastern Eurasia by the example of the giant Anmangynda aufeis. *CATENA* 233, 107530 <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107530>