



## GEOCRYOLOGICAL CONDITIONS OF THE FORMATION OF GIANT SPRING AUFEIS AT THE ANMANGYNDA RIVER (MAGADAN REGION) ACCORDING TO GEOPHYSICAL DATA

V.V. Olenchenko <sup>1</sup>, O.M. Makarieva <sup>2,3</sup>, A.A. Zemlianskova <sup>2,3✉</sup>, A.A. Ostashov <sup>2,4</sup>,  
A.S. Kalganov <sup>1</sup>, A.V. Chekryzhov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

<sup>2</sup>Saint Petersburg University, 7-9 Universitetskaya Emb, Saint Petersburg 199034, Russia

<sup>3</sup>North-Eastern State University, 13 Portovaya St, Magadan 685000, Russia

<sup>4</sup>State Hydrological Institute, 23 2nd Line, Vasilievsky Island, Saint 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 is relevant both from the fundamental point of view of studying the permafrost evolution, and from the practical point of view – for the development of aufeis hazard measures. The aufeis in the Anmangynda River basin (aufeis glade area 7 km<sup>2</sup>) is considered 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 2D 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 3D 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 the 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; Anmangynda River; electrical resistivity tomography; groundwater; talik; fracture; resistivity; cryosphere

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



EDN: GJUKUB

### RESEARCH ARTICLE

**Correspondence:** Anastasiia A. Zemlianskova, [anastasiazemlanskova@gmail.com](mailto:anastasiazemlanskova@gmail.com)

Received: July 12, 2023

Revised: November 4, 2023

Accepted: November 8, 2023

**FOR CITATION:** Olenchenko V.V., Makarieva O.M., Zemlianskova A.A., Ostashov A.A., Kalganov A.S., Chekryzhov A.V., 2024. Geocryological Conditions of the Formation of Giant Spring Aufeis at the Anmangynda River (Magadan Region) According to Geophysical Data. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (2), 0753. doi:10.5800/GT-2024-15-2-0753

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

В.В. Оленченко<sup>1</sup>, О.М. Макарьева<sup>2,3</sup>, А.А. Землянскова<sup>2,3</sup>, А.А. Осташов<sup>2,4</sup>,  
А.С. Калганов<sup>1</sup>, А.В. Чекрыжов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, Россия

<sup>3</sup> Северо-Восточный государственный университет, 685000, Магадан, ул. Портовая, 13, Россия

<sup>4</sup> Государственный гидрологический институт, 199004, Санкт-Петербург, Васильевский о-в, 2 линия, 23, Россия

**АННОТАЦИЯ.** Гигантские наледы, распространенные на северо-востоке России, 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 км<sup>2</sup>) считается типичной для региона, ее исследования проводятся с 1962 г. В пределах наледной поляны в 2022 г. в период максимального оттаивания сезонно-мерзлого слоя были проведены зондирования методом электротомографии с целью выявления подрусловых таликов и обводненных 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 2D инверсии локальными аномалиями пониженного электросопротивления маркируются каналы фильтрации подземных вод. В трехмерных геоэлектрических моделях на участках разгрузки подземных вод выделяются трубообразные аномалии пониженного удельного электрического сопротивления (УЭС), интерпретируемые как каналы 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 трехмерных 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 служат 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 (проект № 94034170, «Комплексная оценка естественных и антропогенных факторов интенсификации водообменных процессов криолитозоны в условиях изменения климата»). Обработка и интерпретация геофизических данных выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований (проект № FWZZ-2022-0024).

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Наледи подземных вод характерны для областей прерывистого и сплошного типа распространения многолетнемерзлых 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; Alekseyev, 2015]. В связи с этим задача изучения и прогноза «наледной формы криогенного морфолитогеоза» [Alekseyev, 2015] приобретает особую актуальность.

Основные представления о развитии наледей были сформированы в прошлом веке [Kalabin, 1957; Tol-

stikhin, 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, фотограмметрия для определения объема льда и др. Для изучения внутреннего строения наледей и наледных полян 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 авторы предположили, 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. Анмангында (Верхнеколымское нагорье, Магаданская область) ведутся работы по развитию комплексного стационара [Makarieva et al., 2021]. В настоящее время в районе исследования действует круглогодичная сеть мониторинга климатических, геокриологических, гидрологических и гидрогеологических процессов, 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. Анмангында, 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 подруслового талика и обводненных 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 распространенным в горной криолитозоне северо-востока России. Она ежегодно формируется в долине одноименной реки. В 2000–2022 гг. по данным снимков Landsat максимальная площадь наледи достигала 5,4 км<sup>2</sup>, что может соответствовать расчетной величине объема льда 8,2 млн м<sup>3</sup> [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 г. группой авторов ведутся комплексные круглогодичные исследования [Makarieva et al., 2021].

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

В пределах наледной поляны, в ее верхней части, в 1966 г. сотрудниками ВСЕГИНГЕО Ю.Н. Бурмистенко, Н.Н. Барохов и Ф.А. Астаховым были выполнены вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) в ограниченном объеме из четырех точек [Solovyova, 1967]. Расстояние между точками было 100–150 м, а максимальные разносы достигали 680 м. Направление разносов питающих электродов АВ совпадало с направлением речной долины. Установленная мощность высокоомных пород, интерпретируемых как мерзлота, составляла 2, 20 и 12 м. Эти породы подстилалась 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. Анмангында. 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 УЭС мерзлых и талых пород, развитостью математического аппарата двумерной и трехмерной инверсии, что позволяет получать реалистичные геоэлектрические модели сложно построенных сред.

Исследования выполнены методом ЭТ в профильном и площадном вариантах для построения 2D и 3D 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 съемки 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 пяти 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 трехэлектродным установкам и взаимной симметричной установке Шлюмберже.

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

Трехмерная инверсия выполнена для набора данных, полученных трехэлектродной установкой. При этом среднеквадратичная ошибка подбора модели для площадки № 1 после пяти итераций составила

11.6 %, а для площадки № 2 после четырех 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, который достигал 10–30 кОм на участках галечника без растительности. Такое высокое и неравномерное сопротивление приводило к очень шумным данным, с большим количеством выбросов на кривых зондирования и графиках профилирования. Особенно

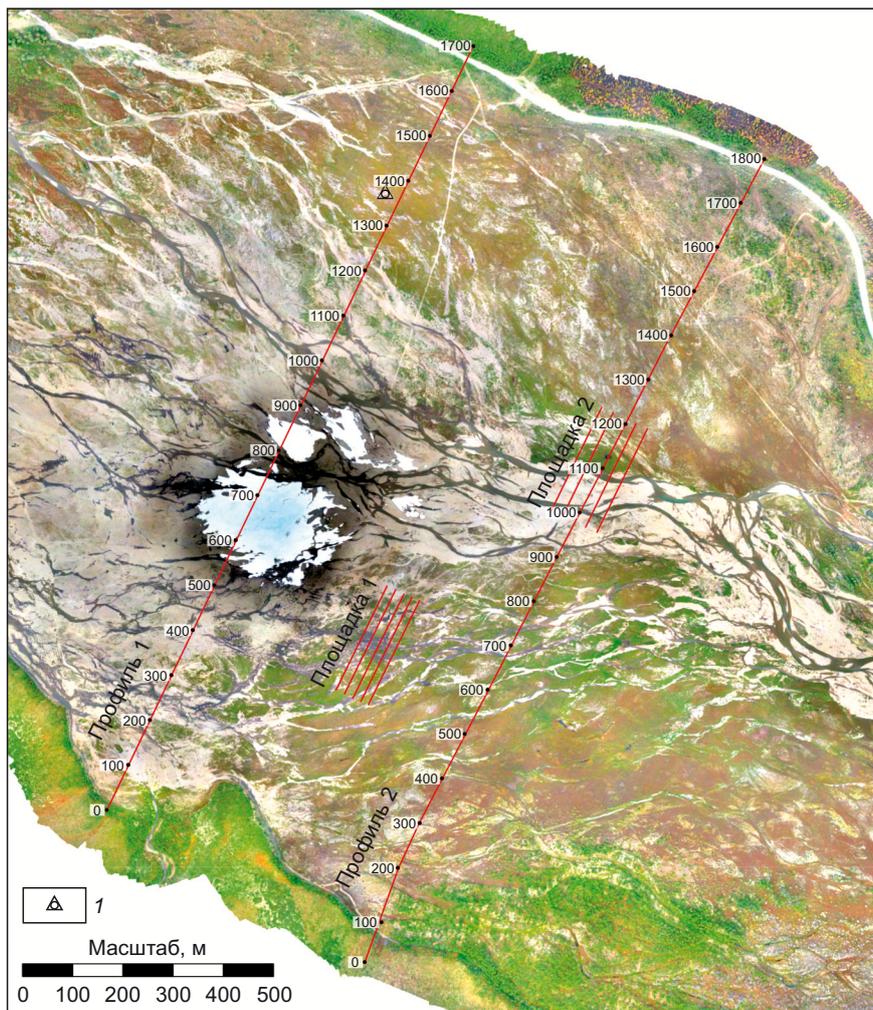
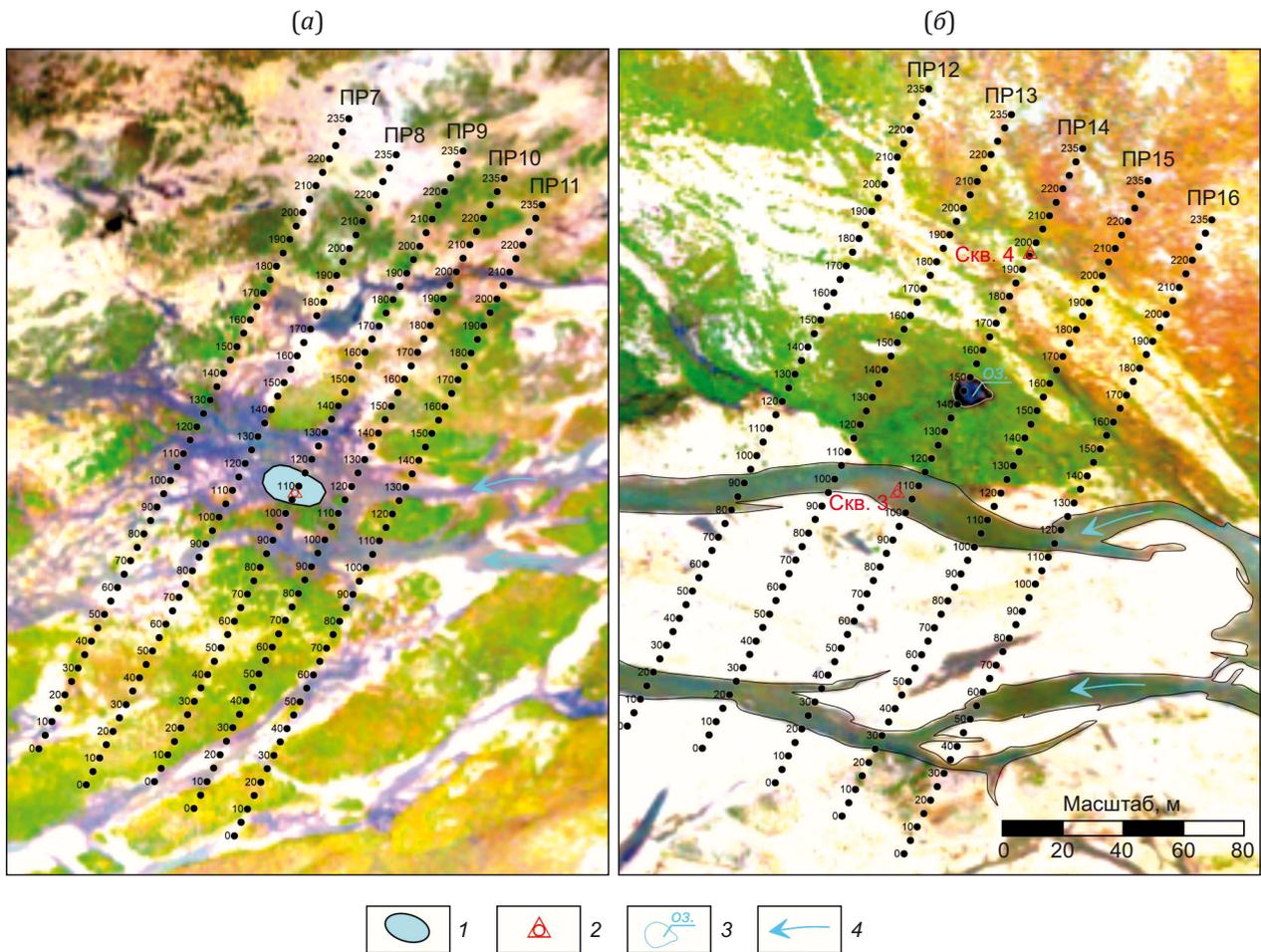


Рис. 1. Схема профилей ЭТ на ортофотоплане наледной поляны от 15.08.2021 г. 1 – термометрическая скважина.

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



**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 (а) 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.

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.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

##### 4.1. Геоэлектрическое строение разрезов

Двумерная инверсия профильных данных ЭТ показала, что 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, мерзлым или талым состоянием.

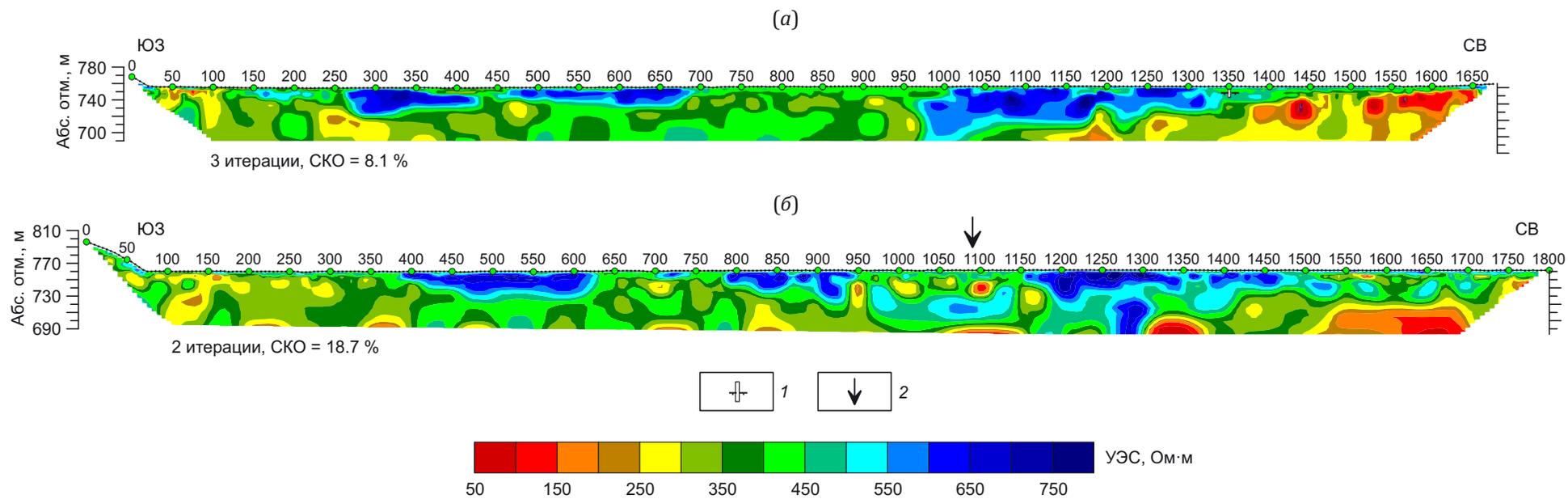
Согласно геологической карте масштаба 1:200000, пойма р. Анмангында сложена четвертичными ледниковыми и аллювиальными песками и галечниками, а борта и основание долины представлены триасовыми песчано-глинистыми сланцами с пластами глинистых сланцев [Geological Map..., 1968]. Максимальным УЭС – 10000–50000 Ом·м – выделяются мерзлые га-

лечниковые 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, Osipova, 2022].

Коренные породы имеют УЭС от 50 до 3000 Ом·м в зависимости от мерзлого 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 мерзлыми аллювиальными отложениями и подстилающими коренными породами достаточно контрастны. Однако толща коренных пород крайне неоднородна по электрическому строению. Обращают на себя внимание области



**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 2022 г. 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.

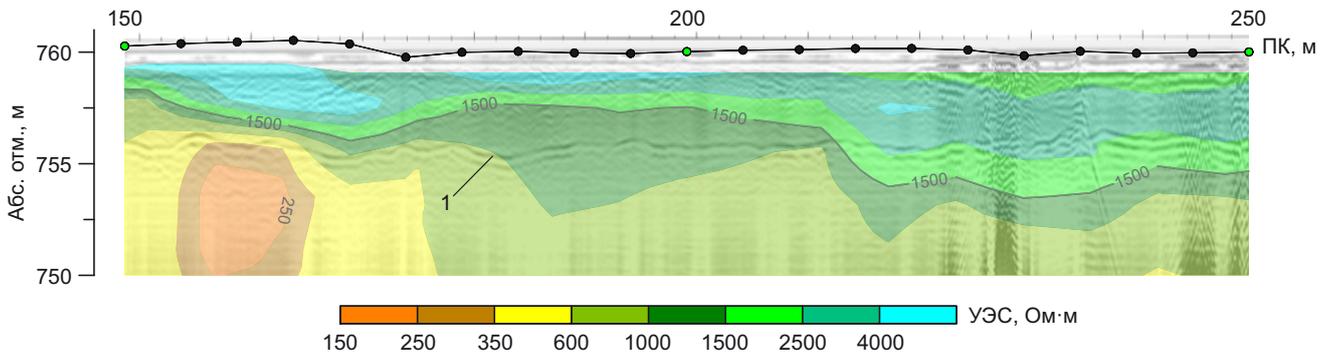
очень низкого УЭС пород (50–150 Ом·м) в северо-восточном окончании профилей у правого берега р. Анмангында.

**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 ее породы находятся в талом состоянии. Это дает 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.

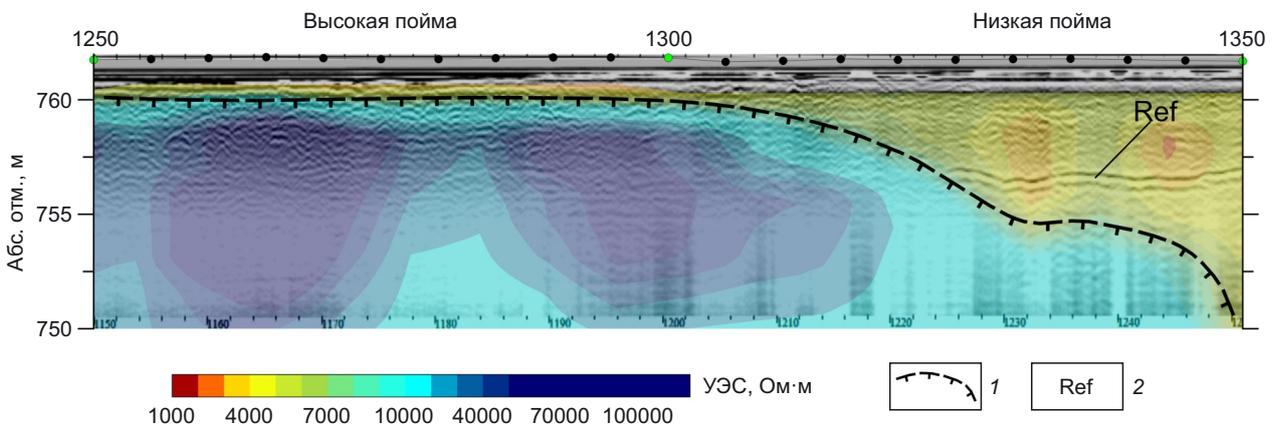
В случае сливающейся мерзлоты на радарограммах исчезает отражающая граница от подошвы слоя сезонного промерзания, что хорошо заметно на фрагменте разреза по профилю № 2 в интервале пикетов 900–950 м (рис. 5). Здесь на высокой пойме многолетнемерзлые породы залегают близко к поверхности, поэтому в годовом цикле промерзания образуется сливающаяся мерзлая 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.

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



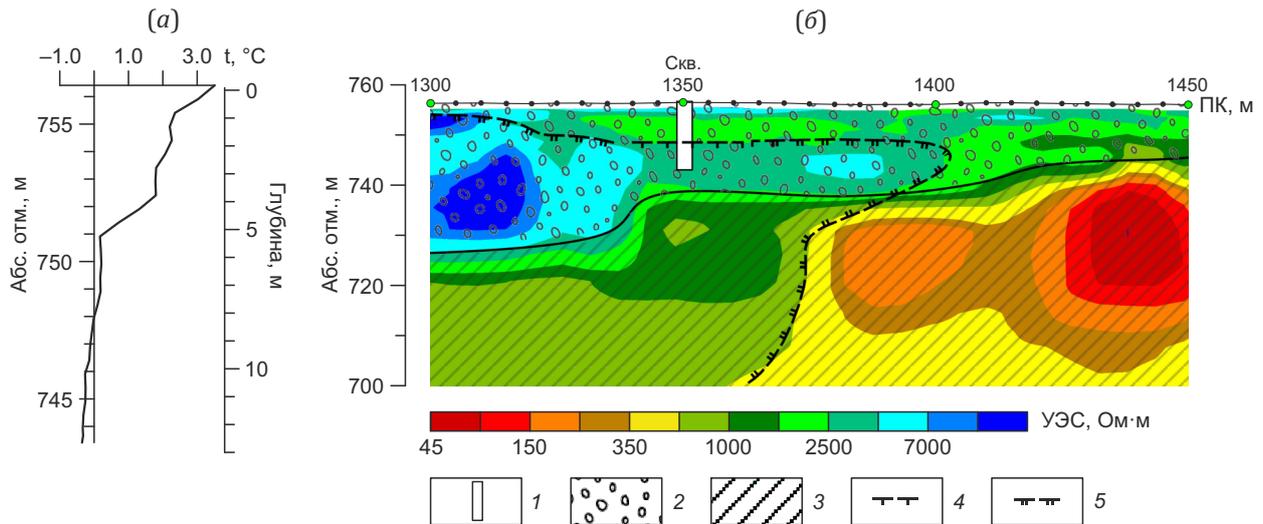
**Рис. 4.** Сопоставление «зимней» радарограммы и данных «осенней» электротомографии на профиле № 2 (см. рис. 1) в интервале талых коренных пород. 1 – отражающая граница от подошвы сезонно-мерзлого слоя.

**Fig. 4.** The comparison of the 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.



**Рис. 5.** Сопоставление «зимней» радарограммы и данных «осенней» электротомографии на профиле № 2 в интервале контакта мерзлых и талых коренных пород. 1 – граница многолетнемерзлых пород по данным ЭТ; 2 – отражающая граница на радарограмме от подошвы сезонно-мерзлого слоя зимой.

**Fig. 5.** The comparison of the ground penetrating radar (GPR) winter section and ERT autumn section at the profile № 2 in the contact zone of frozen and unfrozen bedrock. 1 – the boundary of the permafrost by ERT data; 2 – the reflecting boundary of the seasonally frozen layer base by GPR data.



**Рис. 6.** Изменение температуры по данным скважинной термометрии 27.09.2022 г. (а) и фрагмент геоэлектрического разреза по профилю № 1 по результатам 2D 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 the ground temperature according to the data of thermometric borehole on September, 27 2022 (a) and fragment of the geo-electric section along profile № 1 based on the results of 2D 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.

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 +0.2 °С. Можно полагать, 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.

С глубины 8.6 м и до забоя скважины температура пород понижается до –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 можно интерпретировать как сланцы мерзлые. В то же время в интервале профиля 1400–1450 м УЭС предполагаемых сланцев понижается до 150–400 Ом·м с локальными аномалиями до 45 Ом·м. Вероятно, эти сланцы сильнотрещиноватые в зоне разлома и находятся в талом состоянии. Косвенным признаком талика у правого берега р. Анмангында в области окончания профиля № 1 являются заросли чозении, которые имеют значение биоиндикатора таликовых зон [Mikhailov, 2014].

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

Как следует из табл. 1, диапазон УЭС разных пород перекрывается, что затрудняет однозначную геологи-

**Таблица 1.** Электрические свойства пород наледной поляны по результатам 2D инверсии данных электротомографии  
**Table 1.** Electrical resistivity values of sediments of the aufeis glade according to the 2D inversion of ERT data

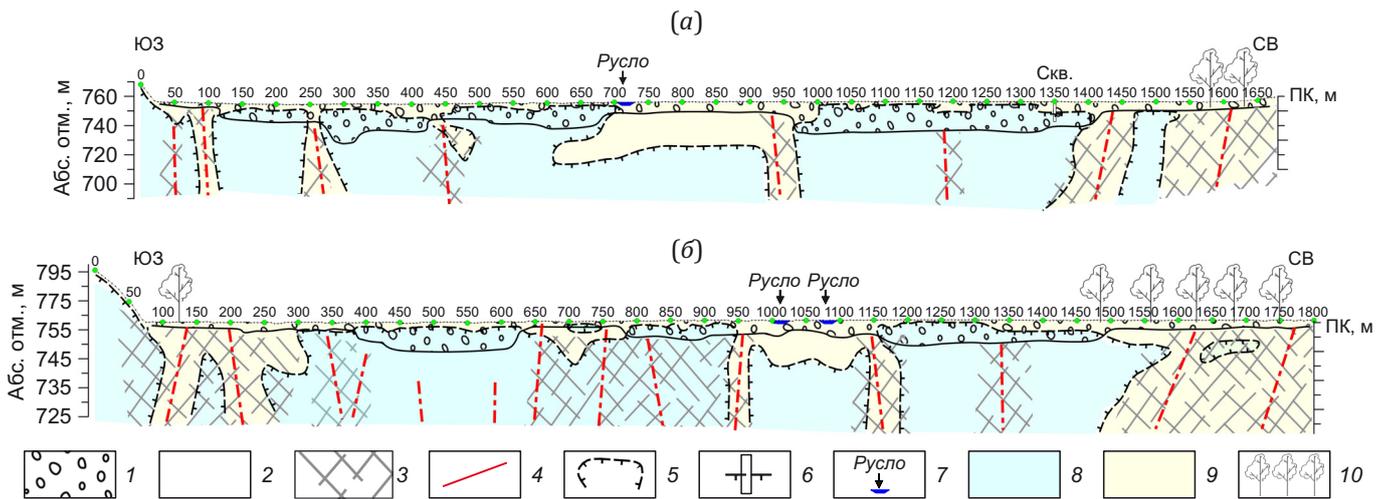
Наименование пород	УЭС, Ом·м
Галечник талый маловлажный	3500–7000
Галечник талый, обводненный	1500–4000
Галечник мерзлый	3500–50000
Сланцы мерзлые	500–3000
Сланцы талые	300–700
Сланцы интенсивно трещиноватые, талые или пиритизированные (?)	<50–200

ческую интерпретацию. Сухие галечники имеют такое же высокое УЭС, как и мерзлые, 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 значения УЭС у мерзлых и талых сланцев могут быть близкими.

**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 многолетнемерзлых пород выделяется на глубине от 2 м на участках высокой поймы до 30 м в подрусловых таликах.



**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 – мерзлые 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*.

Крутопадающие зоны пониженного УЭС интерпретируются авторами как зоны дробления, и можно предполагать, 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 8.5–10.0 м. Такое глубокое залегание кровли ММП связано с надмерзлотными водами, вскрытыми при бурении. На разрезе УЭС хорошо заметно, что слой пород высокого электросопротивления (мерзлые 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, основанное на данных ЭТ, подтверждается и биологическим индикатором талых зон.

Границы многолетнемерзлых 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 протоков р. Анмангында. Такие талики возможны на профиле № 1 между пикетами 700 и 1000 м и на профиле № 2 между пикетами 950 и 1150 м.

**4.4. Анализ трехмерных геоэлектрических моделей**

Исследования на площадке № 1 в области развития наледного бугра, показали, что бугор развивается над подрусовым таликом, который отчетливо прояв-

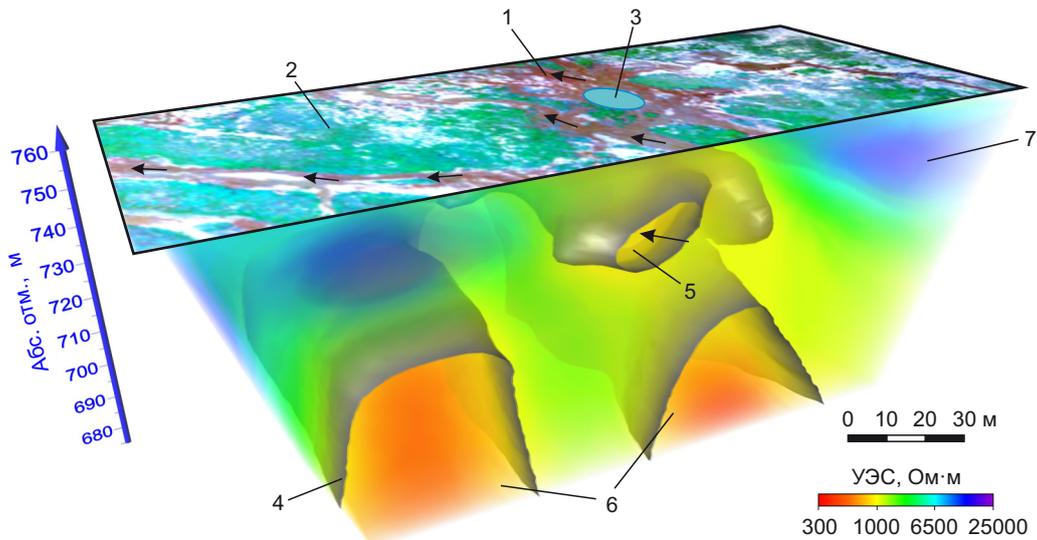
ляется на трехмерной геоэлектрической модели областью пониженного УЭС трубообразной формы (рис. 8). Кроме этого, в разрезе модели выделяются узкие вертикальные аномалии низкого (до 300 Ом·м) УЭС, которые можно связать с разломными зонами в песчано-глинистых сланцах. Мерзлые аллювиальные отложения оконтуриваются по высокому УЭС от 3500 до 26000 Ом·м.

В разрезе трехмерной 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).

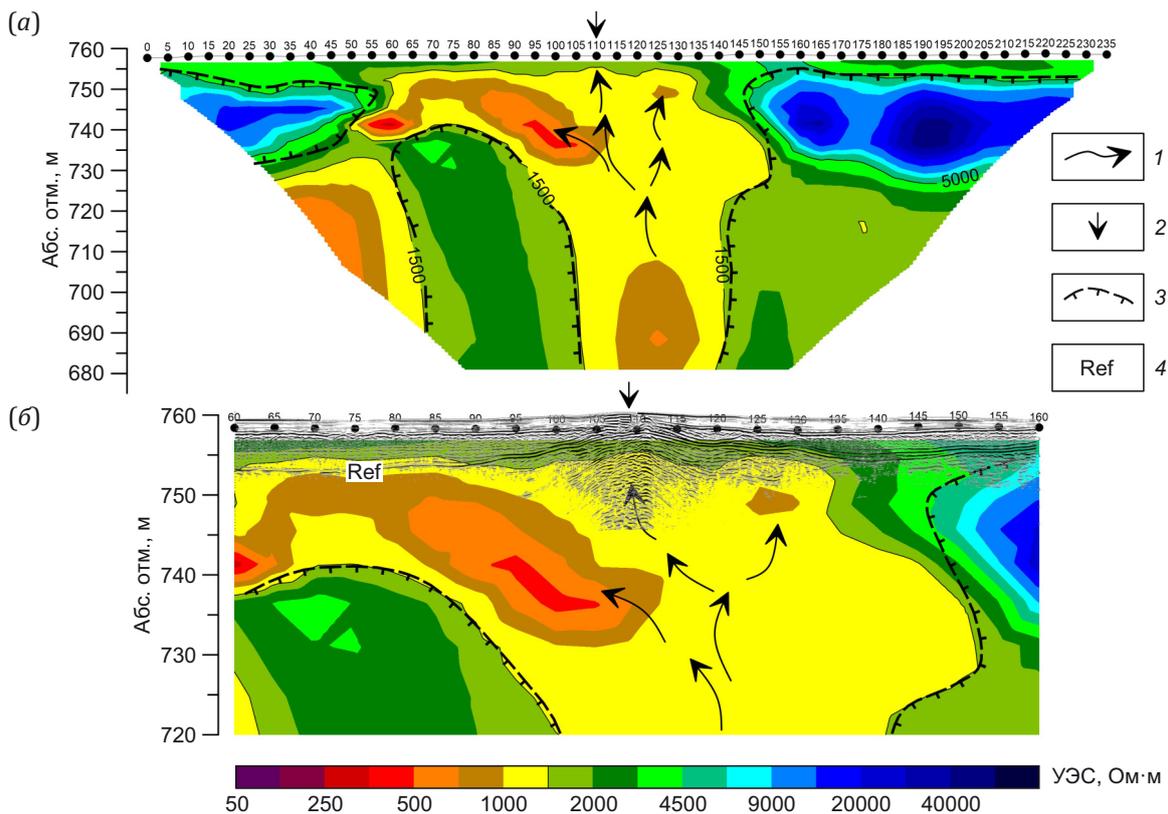
Сопоставление «зимней» радарограммы и фрагмента разреза УЭС пород в период максимального оттаивания показало, что ниже отражающей границы от подошвы сезонно-мерзлого слоя находятся талые породы с УЭС 420–1500 Ом·м (рис. 9, б). Над каналами фильтрации глубина сезонного промерзания минимальна, а сами каналы выделяются по пониженному УЭС пород (ПК 110, ПК 125).

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 неясным – разгружаются воды из подрусового талика в аллювии или представляют собой трещинно-жильные воды разлома.

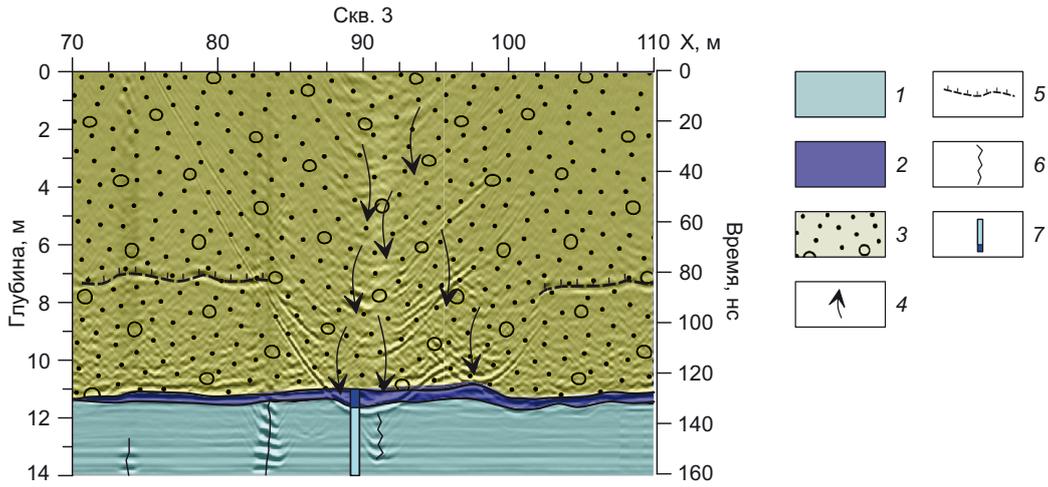
В трехмерной геоэлектрической модели площадки № 2 в разрезе под низкой поймой прослеживается область пониженного УЭС трубообразной формы,



**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 – многолетнемерзлые породы. Стрелками показано направление движения воды.  
**Fig. 8.** Orthophotoplan and 3D geoelectric model of the site № 1. 1 – river channel; 2 – low floodplain; 3 – section of ice mound formation; 4 – surface of electrical resistivity 1300 Ом·м; 5 – channel of groundwater discharge; 6 – fault zone; 7 – permafrost. The arrows indicate the direction of water flow.

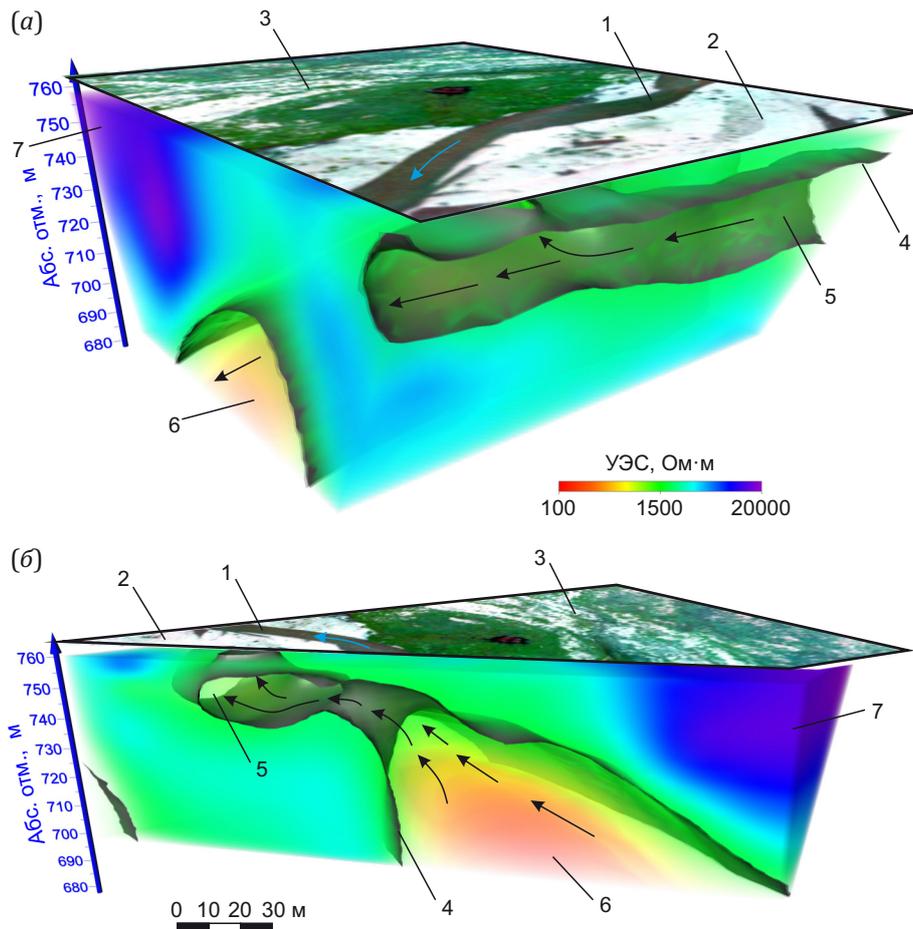


**Рис. 9.** Вертикальный срез 3D модели по профилю № 9 через участок образования наледного бугра (а) и увеличенный фрагмент разреза с «зимней» радарограммой (б). 1 – предполагаемое направление движения воды; 2 – место выхода воды на наледь; 3 – предполагаемая граница ММП; 4 – отражающая граница от подошвы сезонно-мерзлого слоя в зимний период.  
**Fig. 9.** Vertical slice of 3D model of the profile № 9 through the section of ice mound formation (а) 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.



**Рис. 10.** Фрагмент «зимней» радарограммы (250 МГц) через участок разгрузки подземных вод на площадке № 2 с элементами интерпретации. 1 – лед; 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 groundwater discharge zone 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.



**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 – многолетнемерзлые породы. Стрелками показано направление движения воды.

**Fig. 11.** Orthophotoplan and slice of 3D geoelectric model of the site № 2. 1 – river channel; 2 – low floodplain; 3 – high floodplain; 4 – surface of electrical resistivity 1500 Ом·м; 5 – channel of groundwater discharge; 6 – fault zone; 7 – permafrost. The arrows indicate the direction of water flow.

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 можно объяснить зоной дробления. Многолетнемерзлые породы высокой поймы имеют УЭС, достигающее десятков тысяч Ом·м.

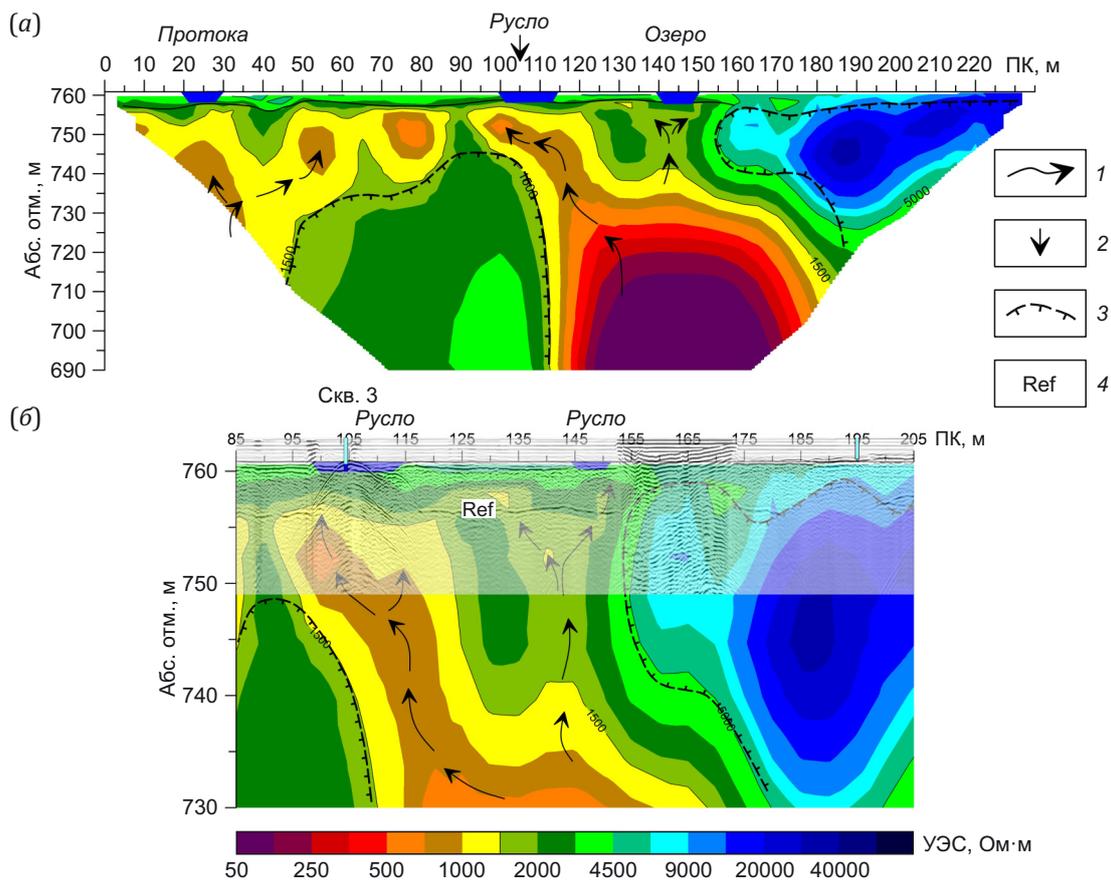
Срез трехмерной модели по диагонали позволяет увидеть связь глубинной низкоомной разломной зоны с трубообразной аномалией в верхней части разреза (рис. 11, б), что дает основание предположить дополнительное питание вод подрусловых таликов трещино-жильными водами разлома.

На вертикальном разрезе трехмерной модели УЭС по профилю № 14 через скважину, вскрывшую напорные воды, видно (рис. 12, а), 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 можно связать с каналами фильтрации в подрусловом тали-

ке. В то же 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.

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

Примечательно то, 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 растет ледяной бугор пучения. Результаты ЭТ показывают, что не исключен



**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 сезонно-мерзлого слоя в зимний период.

**Fig. 12.** Vertical slice of 3D 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.

механизм питания этого озера трещинно-жильными водами.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Механизм питания наледи р. Анмангынды 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 (ММП) высокой поймы располагаются над относительно неглубоко залегающей 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 георадиолокации [Zemlianskova et al., 2023c], 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 обводненная зона трещиноватости коренных пород в пойме р. Детрин, притоком которой является р. Анмангынды, 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. Анмангынды, а также на локальных участках с источниками разгрузки подземных вод из аллювиальных отложений. Вдоль правого берега р. Анмангынды выявлена широкая зона низкого УЭС в коренных породах на всю глубину зондирования (60–80 м). Здесь же на поверхности находятся заросли чозения, которые являются индикаторами пойменных гидрогенных таликов [Mikhailov, 2014].

Согласно архивным геофизическим данным [Solo-yyova, 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. Предыдущие исследования авторов методом

зондирования становлением 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. Анмангынды в месте впадения руч. 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 сечет долину р. Анмангынды поперек, а другой – под углом 30–35° относительно первого [Bukaev, 1969]. В узле разломов расположен постоянно действующий незамерзающий источник. Н.А. Букаев отмечал, что косвенным доказательством наличия источника подмерзлотных вод являются белые налеты 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 [Bukaev, 1969]. Последующий спектральный анализ показал, что белый налет – это двуокись кремния SiO<sub>2</sub> [Lebedev, Ipatieva, 1980], что является неубедительным аргументом в пользу глубинного источника воды. По мнению В.М. Лебедева, питание наледи р. Анмангынды осуществляется за счет аллювиальных вод, дебит которых уменьшается к весне [Lebedev, Ipatieva, 1980]. В.М. Михайлов считает, что «в долине р. Анмангынды, 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, 2005, с. 269].

Данные электромографии подтверждают, что в долине р. Анмангынды в границах наледной поляны существуют талики глубиной до 30 м, но только под крупными протоками, а анализ трехмерных моделей показал, что, наряду с горизонтальными каналами фильтрации трещинно-пластовых вод в зоне экзогенной трещиноватости, существуют геоэлектрические признаки трещинно-жильных вод разломных зон. Такой обводненный разлом горизонтальной мощностью не менее 250 м предполагается вдоль правого борта долины, где на поверхности произрастает чозения.

Можно полагать, что разломы меньших размеров, чем те, в узле которых сформировался крупный сквозной талик, являются дополнительными путями транзита подземных вод в долине р. 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 УЭС, имеющие связь с аномалиями УЭС от каналов фильтрации в толще аллювия.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате электроразведочных исследований в пределах наледной поляны р. Анмангында 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 2D 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 то, что в местах разгрузки подземных вод на лед прослеживаются сквозные аномалии пониженного УЭС от предполагаемых крутопадающих разломов к горизонтальным каналам фильтрации. Можно считать, что таким образом подрусловые талики подпитываются трещинно-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 авторами геофизические данные не будут заверены бурением.

Полученные данные являются уникальными, поскольку несут информацию о строении наледной поляны гигантской наледи подземных вод. Они позволяют расширить представления о комплексе геологических, геокриологических и гидрогеологических процессов, участвующих в наледообразовании, 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 рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

## 8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

## 9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Alekseyev V.R., 2015. Cryogenesis and Geodynamics of Icing Valleys. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (2), 171–224 (in Russian) [Алексеев В.Р. Криогенез и геодинамика наледных участков речных долин // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 2. С. 171–224]. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-2-0177>.

Bukaev N.A., 1969. Basic Regularities in Formation of Giant Aufeis in the Upper Reaches of the Kolyma River (by the Example of the Anmangynda Aufeis). In: *Aufeis in Siberia*. Iss. 4. Nauka, Moscow, p. 62–78 (in Russian) [Букаев Н.А. Основные закономерности режима гигантских наледей в верховьях р. Колымы (на примере Анмангындинской наледи) // Наледи Сибири. М.: Наука, 1969. № 4. С. 62–78].

Geological Map of the USSR, 1968. *Verkhnekolymskaya Series*. Scale 1:200000. Sheet P-55-XXX. Explanatory Note. Nedra, Moscow, 67 p. (in Russian) [Геологическая карта СССР. Серия Верхнеколымская. Масштаб 1:200000. Лист P-55-XXX: Объяснительная записка. М.: Недра, 1968. 67 с.].

Kalabin A.I., 1957. Sources and Aufeis in the North-East of the USSR. *Proceedings of AUSRI-1*. Chapter 1. Permafrost Science. Iss. 7. Magadan, p. 10–32 (in Russian) [Калабин А.И. Источники и наледи подземных вод на Северо-Востоке СССР // Труды ВНИИ–1. Разд. 1. Мерзлотоведение. Магадан, 1957. Вып. 7. С. 10–32].

Kneisel Ch., Hauck Ch., Fortier R., Moorman B., 2008. *Advances in Geophysical Methods of Permafrost Investigations*. Permafrost and Periglacial Processes 19 (2), 157–178. <https://doi.org/10.1002/ppp.616>.

Lebedev V.M., Ipatieva A.I., 1980. The Anmangynda Aufeis, Its Regime and Role in the Water Balance of the River Basin. *Proceedings of DVNIGMI. Hydrological Studies and Forecasts*. Iss. 84. Gidrometeoizdat, Leningrad, p. 86–93 (in Russian) [Лебедев В.М., Ипатьева А.И. Анмангындинская наледь, ее режим и роль в водном балансе речного бассейна // Труды ДВНИГМИ. Гидрологические

исследования и прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1980. Вып. 84. С. 86–93].

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. <https://doi.org/10.1002/ppp.2111>.

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. Part 8, p. 127–178. Available from: [www.geotomosoft.com](http://www.geotomosoft.com) (Last Accessed July 15, 2023).

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. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.105>.

Mikhailov V.M., 2005. Floodplain Taliks of the North-East of Russia. PhD Thesis (Doctor of Geographical Sciences). Yakutsk, 364 p. (in Russian) [Михайлов В.М. Пойменные талики Северо-Востока России: Дис. ... докт. геогр. наук. Якутск, 2005. 364 с.].

Mikhailov V.M., 2014. Geographical Regularities of Distribution of Floodplain Taliks. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography* 1, 65–74 (in Russian) [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>.

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) [Оленченко В.В., Макарьева О.М., Землянскова А.А., Данилов К.П., Осташов А.А., Калганов А.С., Нестерова Н.В., Христофоров И.И. Геофизические признаки источников гигантской наледи на р. Анмангында (Магаданская область) // Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14. № 3. 0702]. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-3-0702>.

Olenchenko V.V., Osipova P.S., 2022. Electrical Resistivity Tomography of Alluvial Deposits during Prospecting for Placer Gold. *Russian Geology and Geophysics* 63 (1), 98–108. <https://doi.org/10.2113/RGG20204203>.

Potapov V.V., Makarieva O.M., Olenchenko V.V., 2022. Geoelectric Structure of the Section on the Anmangynda Ice (Magadan Region) According to the Data of the TEM Method. *Interexpo GEO-Siberia* 2 (3), 59–65 (in Russian) [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]. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-3-59-65.

Report on the Results of the Water Balance Studies with the Aufeis Component in the Anmangynda River Basin, 1977. Kolyma Territorial Administration for Hydrometeorological

and Environmental Monitoring, Magadan, 62 p. (in Russian) [Отчет по результатам воднобалансовых исследований с наледной составляющей в бассейне р. Анмангында. Магадан: Колымское УГМС, 1977. 62 с.].

Romanovsky N.N., 1973. On the Geological Activity of Glaciers. *Permafrost Research. Vol. XIII*. MSU Publishing House, Moscow, p. 66–89 (in Russian) [Романовский Н.Н. О геологической деятельности наледей // Мерзлотные исследования. Вып. XIII. М.: Изд-во МГУ, 1973. С. 66–89].

Solovyova G.V., 1967. Aufeis Regulation of Groundwater Runoff in the Areas of Widespread Occurrence of Permafrost. Final Report. Vol. 1. Moscow, 447 p. (in Russian) [Соловьева Г.В. Наледное регулирование подземного стока в районах широкого развития многолетнемерзлых пород: Окончательный отчет. М., 1967. Т. 1. 447 с.].

Tolstikhin O.N., 1974. Aufeis and Groundwater in the Northeast of the USSR. *Nauka, Novosibirsk*, 164 p. (in Russian) [Толстихин О.Н. Наледи и подземные воды северо-востока СССР. Новосибирск: Наука, 1974. 164 с.].

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. *Exploration into the Biological Resources of Mongolia* 14, 385–398.

Zemlianskova A.A., Alekseev V.R., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V., Makarieva O.M., 2023a. Long-Term Dynamics of the Huge Anmangynda Aufeis in the North-East of Russia (1962–2021). *Ice and Snow* 63 (1), 71–84 (in Russian) [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]. DOI:10.31857/S2076673423010167.

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>.

Zemlianskova A.A., Olenchenko V.V., Makarieva O.M., 2023c. Features of Seasonal Freezing of Sediments of the Aufeis Glade in the Anmangynda River Valley (Magadan Region) Inferred from Ground Penetrating Radar Sounding. In: *Georadar-2023. Collection of Abstracts of the VI Scientific and Practical Conference (March 22–24, 2023)*. Publishing House "Academy of Natural History", Moscow, p. 74–80 (in Russian) [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: Сборник тезисов VI научно-практической конференции (22–24 марта 2023 г.). М.: Издательский дом «Академия Естествознания», 2023. С. 74–80].

Zykov Yu.D., 2007. *Geophysical Methods of Cryolithosphere Research*. MSU Publishing House, Moscow, 264 p. (in Russian) [Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны. М.: Изд-во МГУ, 2007. 264 с.].