



GEOPHYSICAL INDICATORS OF AUFEIS IN THE ANMANGYND A RIVER (MAGADAN REGION)

V.V. Olenchenko ¹, O.M. Makarieva ², A.A. Zemlianskova ^{2,✉}, K.P. Danilov ³,
A.A. Ostashov ^{2,3,4}, A.S. Kalganov ¹, N.V. Nesterova ^{2,4}, I.I. Khristoforov ³

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

²Saint Petersburg University, 7/9 Universitetskaya Emb, Saint Petersburg 199034, Russia

³Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 36 Merzlotnaya St, Yakutsk, 677010, Republic of Sakha (Yakutia) Russia

⁴State Hydrological Institute, 23 2nd Line, Saint Petersburg, 199004, Russia

ABSTRACT. Giant aufeis fields are the indicators of water exchange processes in the permafrost zone. The study of aufeis dynamics is relevant to assessing the state of the cryosphere in a changing climate. The Anmangynda aufeis which forms upstream of the Kolyma River basin, was as large as 6.8 km² in the last century and is considered representative of the mountainous territories in the northeast Russia. In recent decades, there have been significant changes in the aufeis formation regime that require updating the understanding of the cryosphere processes. The historical observational data obtained in 1962–1990 for the Anmangynda aufeis allows using it as the present-day object of research.

The main goal of geophysical research in 2021–2022 was to study the structure of the Anmangynda aufeis and aufeis glade to determine its genesis and development processes. The main tasks were to identify the boundary between frozen and unfrozen rocks, to reveal groundwater discharge channels, and to assess the aufeis thickness distribution. There were carried out georadar survey using an antenna unit with central frequency of 250 MHz and ground-based capacitively coupled electrical resistivity tomography. It was found that by April 5, 2021, the maximum ice thickness was 4.35 m with an average value of 1.35 m, and the volume of aufeis was 3.56 million m³. By means of georadar, there were performed identification and drilling verification of the groundwater discharge channels from alluvium to aufeis surface, located in the stream beds. There is geophysical evidence of deep bedrock groundwater sources. Based on the electrical resistivity tomography data, there were identified large and locally freezing river taliks, from which the water is squeezed onto the ice surface. It is recommended to conduct further interdisciplinary research to clarify the geophysical results obtained.

KEYWORDS: giant aufeis; the Anmangynda River; georadar survey; electrical resistivity tomography; groundwater; talik; aufeis mound; resistivity; cryolithozone

FUNDING: The research is supported by RFBR (projects 20-05-00666, 19-55-80028) and St. Petersburg State University (project 75295776). The processing of geophysical data was partially supported by the Program for Fundamental Scientific Research (project FWZZ-2022-0024).



RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Anastasiia A. Zemlianskova, anastasiazemlanskova@gmail.com

Received: August 17, 2022

Revised: December 9, 2022

Accepted: December 12, 2022

FOR CITATION: 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. doi:10.5800/GT-2023-14-3-0702

Supplementary files: S1_Georadar_survey_verification.gif; S2_Volumetric_radarogram.gif; S3_Volumetric_geoelectrical_model.gif

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ ИСТОЧНИКОВ ГИГАНТСКОЙ НАЛЕДИ НА Р. АНМАНГЫНДА (МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

В.В. Оленченко¹, О.М. Макарьева², А.А. Землянкова², К.П. Данилов³, А.А. Остахов^{2,3,4},
А.С. Калганов¹, Н.В. Нестерова^{2,4}, И.И. Христофоров³

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

² Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, наб. Университетская, 7-9, Россия

³ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Республика Саха (Якутия), Россия

⁴ Государственный гидрологический институт, 199004, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 2-я линия, 23, Россия

АННОТАЦИЯ. Гигантские наледи являются индикаторами процессов водообмена в зоне распространения мерзлоты. Исследование динамики наледей является актуальной задачей оценки состояния криосферы в изменяющемся климате. Анмангындинская наледь, формирующаяся в верховьях бассейна р. Колымы, в прошлом веке достигала размеров 6.8 км² и считается репрезентативной для горных территорий северо-востока России. В последние десятилетия произошли значительные изменения режима наледообразования, требующие актуализации представлений о процессах криолитозоны. Наличие исторических данных наблюдений на Анмангындинской наледи позволяет использовать ее как объект исследований в настоящее время.

Целью геофизических исследований 2021–2022 гг. являлось изучение строения Анмангындинской наледи и наледной поляны для уточнения ее генезиса и процессов формирования. Основными задачами были выявление границ мерзлых и талых пород, каналов разгрузки подземных вод и оценка распределения толщины наледного льда. Проведены георадиолокационные зондирования с антенным блоком центральной частоты 250 МГц и электротомография с заземлениями через емкостную связь. Установлено, что к 5 апреля 2021 г. максимальная толщина льда составила 4.35 м при среднем значении 1.35 м, объем наледи – 3.56 млн м³. С помощью георадара выявлены и заверены бурением каналы разгрузки подземных вод из аллювия под лед, расположенные в руслах проток. Выявлены геофизические признаки глубинных источников подземных вод в коренных породах. По данным электротомографии установлено наличие крупных и локальных промерзающих подрусловых таликов, из которых выжимается вода на поверхность льда.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гигантская наледь; р. Анмангында; георадиолокационное зондирование; электротомография; подземные воды; талик; наледный бугор; удельное электрическое сопротивление; криолитозона

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования проводятся при поддержке РФФИ (проекты 20-05-00666, 19-55-80028) и Санкт-Петербургского государственного университета (проект 75295776). Обработка геофизических данных выполнена при частичной поддержке проекта Программы фундаментальных научных исследований FWZZ-2022-0024.

1. ВВЕДЕНИЕ

Формирование наледей подземных вод является характерной чертой процессов водообмена горной криолитозоны различных регионов мира. Наиболее ярко процессы наледообразования проявляются на северо-востоке России, где наледи могут достигать десятков квадратных километров. Динамика характеристик гигантских наледей, легко идентифицируемых на космических снимках, может использоваться как индикатор процессов трансформации труднодоступных территорий криолитозоны в современном климате. Однако реакция наледей на климатические факторы в значительной степени зависит от генезиса их формирования [Romanovsky, 1983]. Как показали современные исследования, общая тенденция повышения температуры воздуха в арктических регионах и увеличение количества осадков в теплый период года способствовали

увеличению числа наледей на северо-востоке России, сокращению их максимальных размеров до начала таяния, а также миграции отдельных ледяных полей [Aleksseev et al., 2021].

Проблема определения генезиса вод, питающих наледи, была поставлена еще в 30-е годы прошлого века и до сих пор не решена. Согласно представлениям [Zonov, 1944] наледи образуются в результате промерзания подрусловых и пойменных таликов, в которых аккумулируются надмерзлотные подземные воды в течение теплого периода. По другим представлениям [Shvetsov, 1951] источником воды, образующей гигантские наледи, являются подмерзлотные трещинно-жильные воды тектонических нарушений.

Несмотря на то, что классификация гигантских наледей по генезису и механизмам формирования разработана еще в прошлом веке [Koreisha, 1987; Romanovsky,

1983], фактических данных геофизических исследований (электроразведка, сейсмика, разведочное бурение), подтверждающих эти теории, очень мало. Единственной известной авторам крупной работой по исследованию наледей с помощью геофизических методов является отчет гидрогеологической экспедиции тематической гидрогеологической партии по составлению карт под руководством ВСЕГИНГЕО [Solovyova, 1967]. В нем представлены сведения о наблюдениях, проводившихся на территориях Южной Якутии и Магаданской области.

В последние годы произошло значительное развитие геофизических технологий исследования геологической среды. Новая аппаратура на современной элементной базе и программное обеспечение для обработки данных и решения обратных задач геофизики существенно повысили информативность геофизических исследований. Они показали высокую эффективность и при изучении наледей, при этом используются методы георадиолокации, электротомографии с гальваническими и емкостными заземлениями, метод ядерного магнитного резонанса, тепловизионная съемка [Liu et al., 2021; Terry et al., 2020]. С помощью георадиолокации определяется толщина льда, глубина сезонного промерзания, а данные электротомографии позволяют определять мерзлое или талое состояние горных пород ниже отражающих границ, выделяемых на радарограммах [Liu et al., 2021]. Применение метода ядерного магнитного резонанса дает возможность оценки количества гравитационной воды в поровом пространстве, выявления талых и мерзлых пород в разрезе под наледью [Terry et al., 2020].

Гигантская наледь на р. Анмангында (верховья бассейна р. Колымы), с 1962 по 2021 г. достигавшая площади от 3.54 до 6.75 км², уникальна наличием многолетнего ряда (1962–1990 гг.) данных наблюдений за процессами наледообразования [Report..., 1977]. Она считается репрезентативным объектом для изучения гигантских наледей северо-востока России [Tolstikhin, 1974]. На этом объекте в 1966 г. были проведены электроразведочные работы для определения мощности многолетнемерзлых пород (ММП) и характера мерзлоты. Интерпретация данных вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) показала наличие многолетнемерзлых пород под слоем аллювия, мощностью 2–20 м, ниже которых находятся водонасыщенные коренные породы. Но результаты поставлены под сомнение в связи с недостаточной геологической и гидрогеологической интерпретацией полученных данных [Solovyova, 1967].

Генезис вод, формирующих Анмангындинскую наледь, до сих пор точно не определен. Относительная транспортная доступность, 150–159 км Тенькинской трассы в 30 км от пос. Усть-Омчуг, позволила возобновить мониторинг и междисциплинарные исследования природных процессов на этой наледи [Makarjeva et al., 2021; Zemlianskova et al., 2022].

Целью наших геофизических исследований являлось изучение строения Анмангындинской наледи и

наледной поляны для уточнения ее генезиса и процессов формирования. Основными задачами были выявление границ мерзлых и талых пород, каналов разгрузки подземных вод (ПВ) и оценка распределения толщины наледного льда.

Для решения поставленных задач применялись методы георадиолокации (ГРЛ) и бесконтактного измерения электрического поля (БИЭП).

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Анмангындинская наледь расположена в Тенькинском городском округе Магаданской области, в бассейне р. Анмангында, которая является правым притоком р. Детрин, впадающей в р. Колыму. Средняя многолетняя годовая температура воздуха в районе исследований по данным метеорологической станции (м/с) Усть-Омчуг составляет около –11 °С (1967–2021 гг.). Годовое количество осадков достигает 342 мм. Максимальная высота снежного покрова по данным м/с Усть-Омчуг (2000–2021 гг.) варьируется от 27 до 75 см, а в среднем составляет 43 см. На территории Анмангындинской наледи максимальная измеренная высота снега в 2021–2022 г. составила 58.6 см, на самой наледи – 10 см.

Площадь бассейна р. Анмангында в замыкающем створе ниже наледной поляны составляет 376 км², абсолютная высота 700–1850 м. Растительность представлена лиственничным лесом на мохово-лишайниковой подстилке, местами – кедровым стлаником и пятнами открытой тундры, в верховьях простирается гольцово-тундровый ландшафт. Дно долины р. Анмангында сложено аллювием, на участках, где наледь лежит продолжительное время, образуется кочкарник, а также растет густой ивняк, карликовая береза, голубика, чозения.

Река Анмангында на некоторых участках не замерзает круглый год. В 200 м выше наледи и в средней части наледной поляны в 2021–2022 г. по данным круглогодичных наблюдений за стоком средний расход воды в зимний период (декабрь – март) был 0.47 м³/с и 0.10 м³/с соответственно. Средний годовой расход воды р. Анмангында в замыкающем створе ниже наледи по данным Колымского управления гидрометеорологической службы составлял 3.71 м³/с (1962–1987 гг.), годовой слой стока в среднем – 314 мм, а вклад наледного питания – 23 мм, т.е. 5–10 % (1963–1979 гг.).

В геологическом плане район исследований сложен пермскими и триасовыми отложениями, долины рек – четвертичным аллювием [Geological Map..., 1968].

Пермские отложения представлены нерючинской и кулинской свитами (P2ng+kl). Нерючинская свита сложена преимущественно глинистыми сланцами. Выше лежащая кулинская свита характеризуется значительным развитием алевролитов, песчаников, мелкогалечных конгломератов и туфогенных сланцев.

Отложения нижнего отдела триаса сложены глинистыми и песчано-глинистыми сланцами, а средний

отдел триаса представлен анизийским ярусом, алевролитами, песчано-глинистыми сланцами.

Современный аллювий в долине р. Анмангында состоит преимущественно из крупно- и среднегалечного материала с подчиненным количеством мелких валунов, гравия, песков, супесей. Мощность аллювиальных отложений варьируется в пределах 6–12 м [Potapov et al., 2022].

В районе исследований развиты многолетнемерзлые породы, мощность которых на водоразделах достигает 300 м, а в долинах рек сокращается до 80–100 м. Температура ММП в середине прошлого века в слое нулевых годовых колебаний составляла от -1.7 до -3.5 °C [Geological Map..., 1968]. Складчатые структуры района исследований осложнены многочисленными тектоническими разрывами субширотного и северо-западного простирания мощностью от первых метров до 35 м и более. Разломы обычно имеют крутое падение – 70 – 90 °.

Подземные воды района делятся на подмерзлотные и надмерзлотные. Надмерзлотные воды привязаны к таликовым зонам речных долин и образуют подрусло-вые потоки в рыхлых аллювиальных отложениях и зоне трещиноватости в коренных породах. По общепринятым представлениям, при перемерзании подрусло-вых потоков подземные воды выходят на поверхность выше места перемерзания и формируют наледь.

Наледная поляна, площадь которой составляет 7.6 км² (2 % от площади бассейна р. Анмангында), сформировалась в долине р. Анмангында под воздействием ежегодно образующейся здесь наледи, которая представлена двумя округлыми ледяными массивами, соединенными между собой небольшим перешейком.

Средняя толщина наледи на конец периода наледообразования в 1962–1990 гг. изменялась от 1.1 до 1.8 м, средняя величина составила 1.5 м. Максимальная толщина, указанная в отчетных материалах полевых наблюдений, составила 5.9 м [Report..., 1977]. Анализ материалов исторических наблюдений показал тенденцию сокращения максимальных размеров наледи с 1962 по 1990 г. [Alekseev et al., 2012]. Современная оценка, выполненная на основе данных дистанционного зондирования, также свидетельствует о значительном уменьшении максимальных размеров Анмангындинской наледи и изменении сезонного режима формирования льда [Zemlianskova et al., 2023].

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения общего объема льда, сформированного наледью, изучения распределения толщины льда по всей площади наледной поляны, а также в целях поиска мест разгрузки источников, питающих наледь, в марте – апреле 2021 г. методом георадиолокационной съемки были проведены площадные георадиолокационные зондирования по сети из 29 поперечных и одного продольного профиля, расположенным на расстоянии около 200 м друг от друга. Кроме того, на верхней наледи проведены зондирования на шести

профилях, расположенных на расстоянии около 50 м (рис. 1, а). По результатам съемки были обнаружены потенциальные места разгрузки источников, а также аномальные участки.

В 2022 г. метод георадиолокационной съемки был применен повторно на двух ключевых участках, отобранных по данным за предыдущий год. На выявленных аномальных участках проведены профильные зондирования и детальные площадные исследования методами ГРЛ и БИЭП (рис. 1, б).

Ключевой участок № 1 (размер площадки исследования 70×50 м) выбран на месте формирования ледяного бугра для изучения структуры канала разгрузки воды вокруг него. На участке проведены площадные георадиолокационные зондирования по сети профилей на расстоянии 5 м друг от друга, на бугре – до 2.5 м. На каждом профиле определялась глубина отражающей границы от подошвы слоя сезонного промерзания ($H_{смс}$), по результатам съемки построена карта изолиний $H_{смс}$. Через ледяной бугор был проложен профиль электрических зондирований по методике ДОЗ-БИЭП длиной 270 м.

Ключевой участок № 2 (размер площадки исследования 50×20 м) расположен над руслом реки. В пределах этой площадки выполнены зондирования ГРЛ и многоразносное профилирование БИЭП с шагом 5 м по 11 профилям, расположенным на расстоянии 2 м друг от друга, для изучения особенности сезонного промерзания аллювия.

Георадиолокация. Георадиолокационное зондирование выполнено с помощью георадара ОКО-3 с антенным блоком центральной частоты 250 МГц. Георадар перемещался волоком по льду или в пластиковом коробе, когда на поверхности льда был слой воды. Шаг зондирования по профилям составлял 0.05 м. Протяженность профиля определялась либо с помощью датчика перемещения, прикрепленного к георадару, либо с помощью измерительной рулетки.

Обработка данных выполнена с помощью программы Geoscan32. Граф обработки включал вычитание среднего и регулировку усиления по глубине. Пересчет временного разреза в глубинный осуществлялся для средних значений диэлектрической проницаемости (ДП) среды, равной 3.2, что соответствует пресноводному льду. Такое значение ДП среды было определено инструментами программы Geoscan32 по гиперболом дифракции отраженной волны от локальных объектов.

В 2021 г. высота снежного покрова на залесенных участках наледной поляны максимально составила 30 см, а на самой наледи снег практически отсутствовал. При интерпретации радарограмм эта информация не использовалась, так как высота снежного покрова входила в первую фазу зондирующего сигнала. Для заверки георадиолокационной съемки были пробурены скважины на профилях с целью определения фактической толщины льда. Погрешность составила менее 5 %.

Бесконтактные измерения электрического поля (БИЭП). Измерения методом БИЭП проведены в модификациях дипольно-осевого зондирования (ДОЗ-БИЭП) и многоразностного электропрофилеирования (ЭП-БИЭП).

Измерения выполнены аппаратурой ВЕГА, работающей на частоте 16 кГц. Размеры емкостных линий составляли 5 м при электропрофилеировании и 10 м при

дипольно-осевом зондировании. Расстояние между центрами генераторной и приемных линий при многоразностном профилировании составляло 5, 15, 25, 35 м при размерах диполей, равных 5 м (рис. 2). При осевом зондировании применялись диполи АВ и MN размером 10 м, расстояние между центрами которых увеличивалось от 5 до 80 м с шагом 5 м. Сила тока в питающей линии составляла 3 или 10 мА. Напряжение

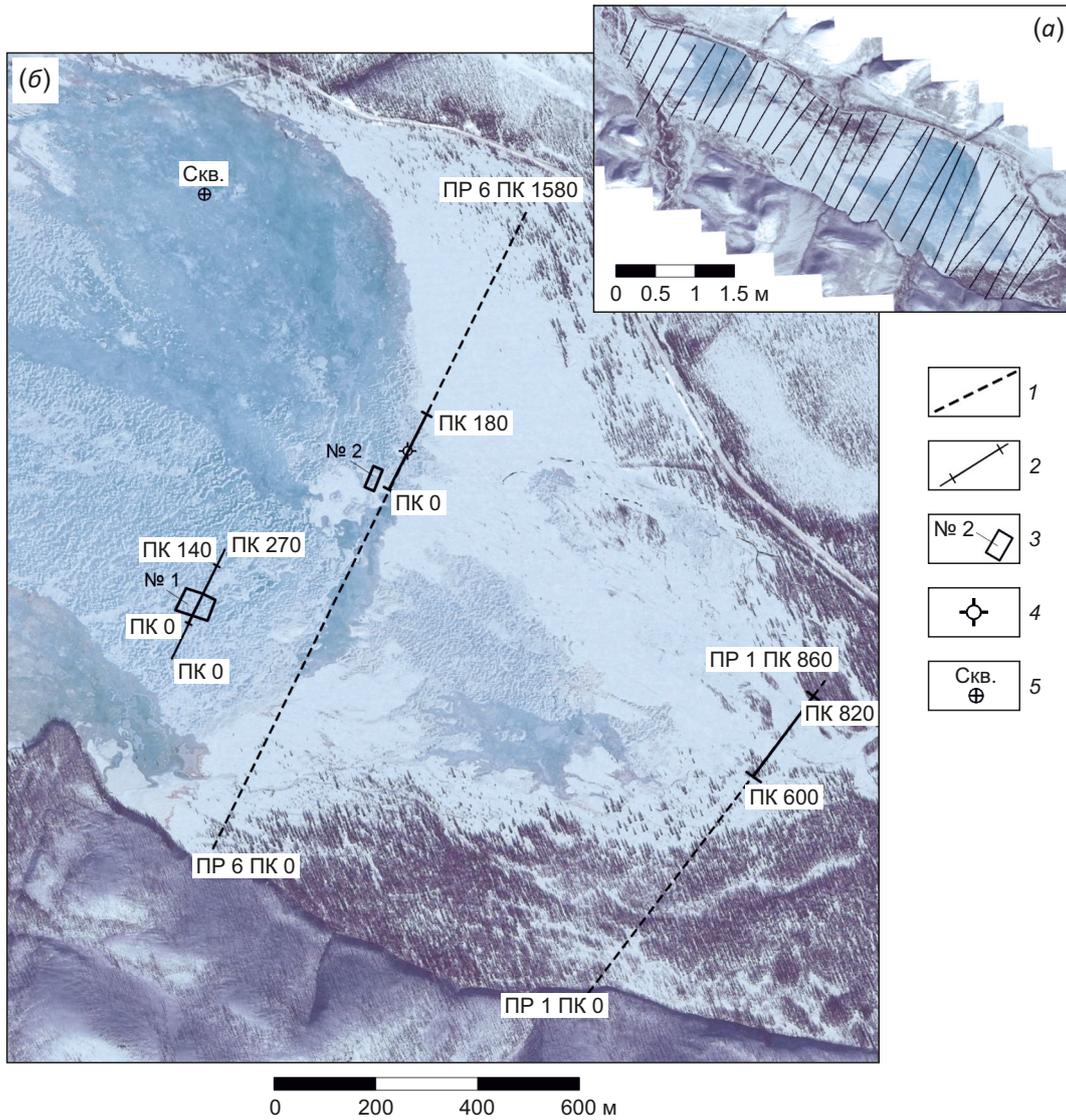


Рис. 1. Схема расположения профилей георадиолокации 2021 г. (а) и участков работ 2022 г. (б) на спутниковом снимке Bing.com/maps/. 1 – профили георадиолокации 2021 г.; 2 – профили и интервалы исследований 2022 г.; 3 – площадки детальных исследований; 4 – скважина, вскрывшая источник напорных вод; 5 – термометрическая скважина.

Fig. 1. Location scheme for georadar profiles in 2021 (a) and areas of work in 2022 (б) shown in the satellite image Bing.com/maps/. 1 – georadar profiles 2021; 2 – profiles and survey intervals in 2022; 3 – detailed-survey sites; 4 – artesian well; 5 – thermometric well.

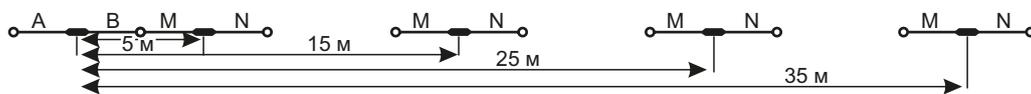


Рис. 2. Схема четырехразностного электропрофилеирования дипольно-осевой установкой с незаземленными линиями (ЭП-БИЭП).

Fig. 2. The scheme of four-difference electrical profiling by an axial dipole-dipole array system with ungrounded lines (EP-NCEFMM).

в приемных линиях в зависимости от разноса варьировалось от 4 В до 0.12 мВ.

Двумерная автоматическая инверсия данных была выполнена с помощью программы Res2Dinv [Loke, 2014]. Для получения трехмерной геоэлектрической модели использовалась программа Res3Dinv.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Распределение толщины льда и объем наледи

По данным площадной съемки была определена толщина льда вдоль профилей ГРЛ и построена схема распределения толщины льда. На момент исследований (25 марта – 5 апреля 2021 г.) установленная максимальная толщина льда на верхней наледи составила 4.35 м при среднем значении 1.4 м, на нижней – 3.5 м при среднем значении 1.3 м (рис. 3). Зафиксировано, что наибольшая толщина льда образуется локально, предположительно, в районах разгрузки источников, питающих наледь. Объем наледного льда по результатам георадиолокационной съемки в начале апреля 2021 г. составил 3.56 млн м³, по историческим данным 1963–1966 гг. в этот период он достигал 8.56 млн м³ (в 2.4 раза больше). Ранее авторами было установлено, что формирование наледи заканчивается в конце апреля – середине мая, т.е. максимальный объем льда наблюдается в эти месяцы. Так, по историческим данным он варьировался от 5.3 до 11.7 млн м³. По современным оценкам по линии тренда величина ледозапаса на конец периода наледообразования меньше на

33 % и в среднем составляет 7.1 млн м³ [Zemlianskova et al., 2023].

4.2. Исследование участков разгрузки подземных вод под лед

Анализ радарограмм по всем профилям 2021 г. показал, что на многих амплитудных разрезах кроме границы лед – порода и границы сезонного промерзания выделяются крупные гиперболы дифракции с очень интенсивной отраженной волной. При этом в месте образования гиперболы отмечается резкое сокращение глубины сезонного промерзания (рис. 4), вплоть до исчезновения отражающей границы от подошвы сезонно-мерзлого слоя (СМС). Такие гиперболы наблюдаются над руслами проток реки и, предположительно, в тех местах, где происходит разгрузка подземных вод в русле. На рис. 4 на пикетах 742.5 и 770 м на радарограммах отчетливо проявляются вертикальные аномалии, которые, возможно, связаны с разгрузкой подземных вод из разломов.

Положение интенсивной отражающей границы, которую мы интерпретируем как подошву слоя сезонного промерзания, совпадает с переходом температуры через 0 °С по данным термометрической скважины (рис. 5).

Интервал разреза от 4.5 до 10.5 м с безградиентным изменением температуры интерпретируется как обводненная толща. С глубины 10.5 м отмечается понижение температуры пород с глубиной со слабым градиентом –0.02 °С/м. Высокотемпературная мерзлота

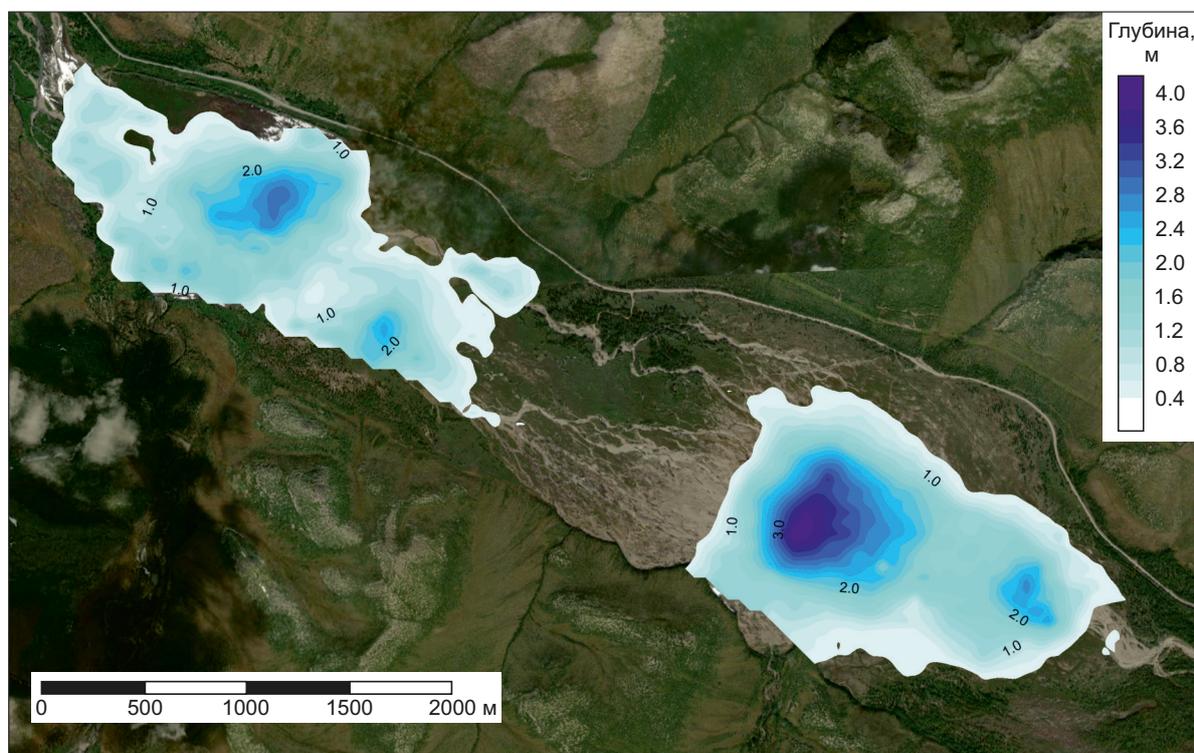


Рис. 3. Схема распределения толщины льда Анмангындинской наледи по результатам ГРЛ съемки в апреле 2021 г.

Fig. 3. The scheme of the Anmangynda aufeis thickness distribution based on the results of the georadar survey in April 2021.

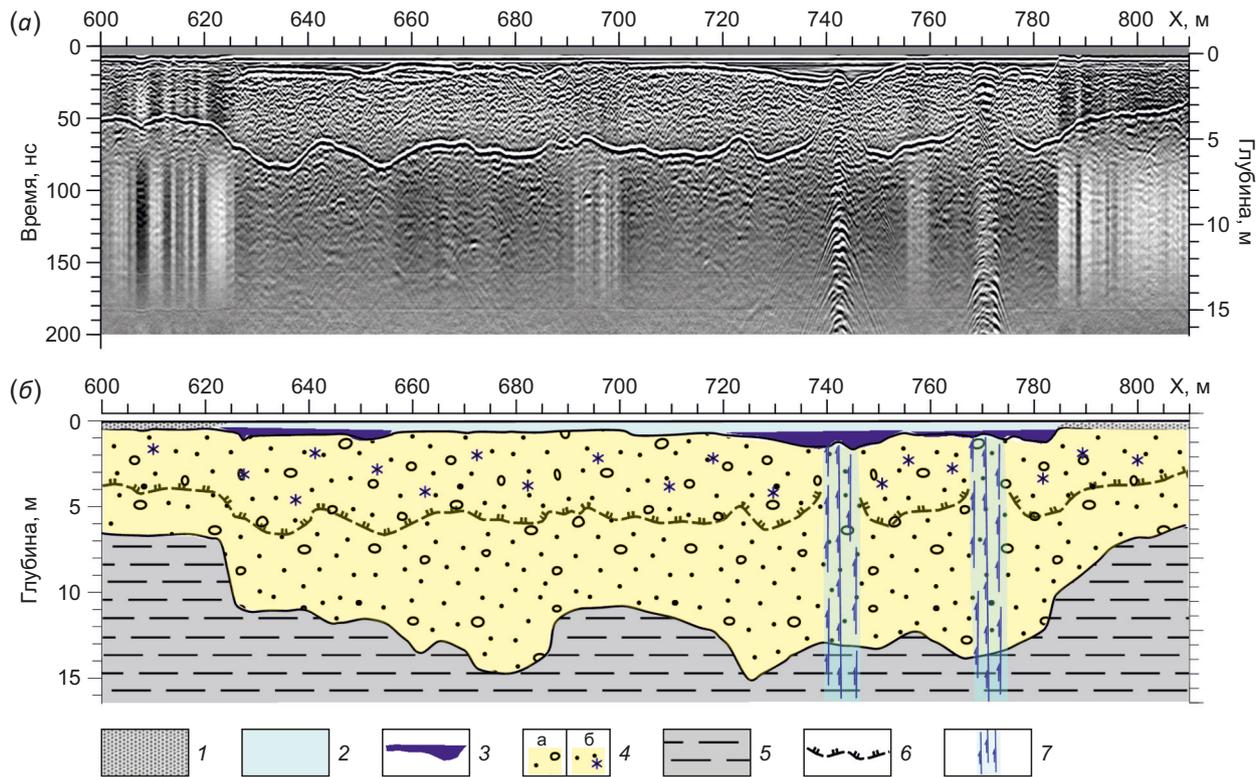


Рис. 4. Фрагмент радарограммы по профилю № 1 через долину р. Анмангында в начале наледной поляны (а) и ее интерпретация (б).

1 – снег; 2 – лед; 3 – вода; 4 – аллювий талый (а) и мерзлый (б); 5 – коренные породы (сланцы); 6 – граница сезонного промерзания; 7 – восходящие каналы фильтрации в аллювии.

Fig. 4. A fragment of the radarogram on profile № 1 across the valley of the Anmangynda River at the beginning of the aufeis glade (а) and its interpretation (б).

1 – snow; 2 – ice; 3 – water; 4 – thawed alluvium (а) and frozen alluvium (б); 5 – bedrock (shale); 6 – boundary of seasonal freezing; 7 – ascending filtration channels in alluvium.

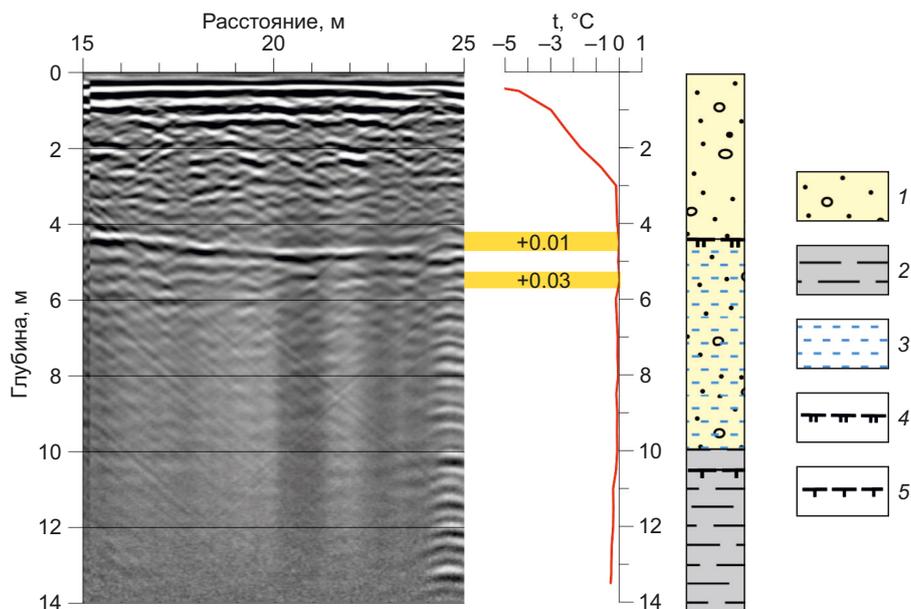


Рис. 5. Фрагмент радарограммы по профилю через термометрическую скважину, график температуры по данным термометрии и геологический разрез. 1 – аллювиальные отложения; 2 – сланцы; 3 – обводнение; 4 – граница сезонного промерзания; 5 – кровля многолетнемерзлых пород.

Fig. 5. A fragment of the radarogram on the profile across the thermometric well, a temperature graph based on the thermometric data, and a geological section. 1 – alluvial deposits; 2 – shales; 3 – flood; 4 – boundary of seasonal freezing; 5 – permafrost top.

в основании разреза означает близость постоянного источника тепла в виде гидрогенного талика.

В 2022 г. на отрезке длиной 190 м профиля № 6 (см. рис. 1, б), где по результатам ГРЛ прошлого года выделены интенсивные гиперболы дифракции, зондирующая съемка была проведена повторно. На радараграмме 2022 г. отмечена серия трещин и ледяной бугор между пикетами 135–160 м в виде интенсивных

переотражений сигнала (рис. 6, а), которые обычно связывают с наличием воды в породах. Это означает, что внутри ледяного бугра находилась вода в жидком состоянии, а свежие трещины образовались в результате давления воды. В интервале 165–180 м отражающая граница от подошвы слоя СМС пропадает, что авторы объясняют сливающимся типом мерзлой толщи в данном месте.

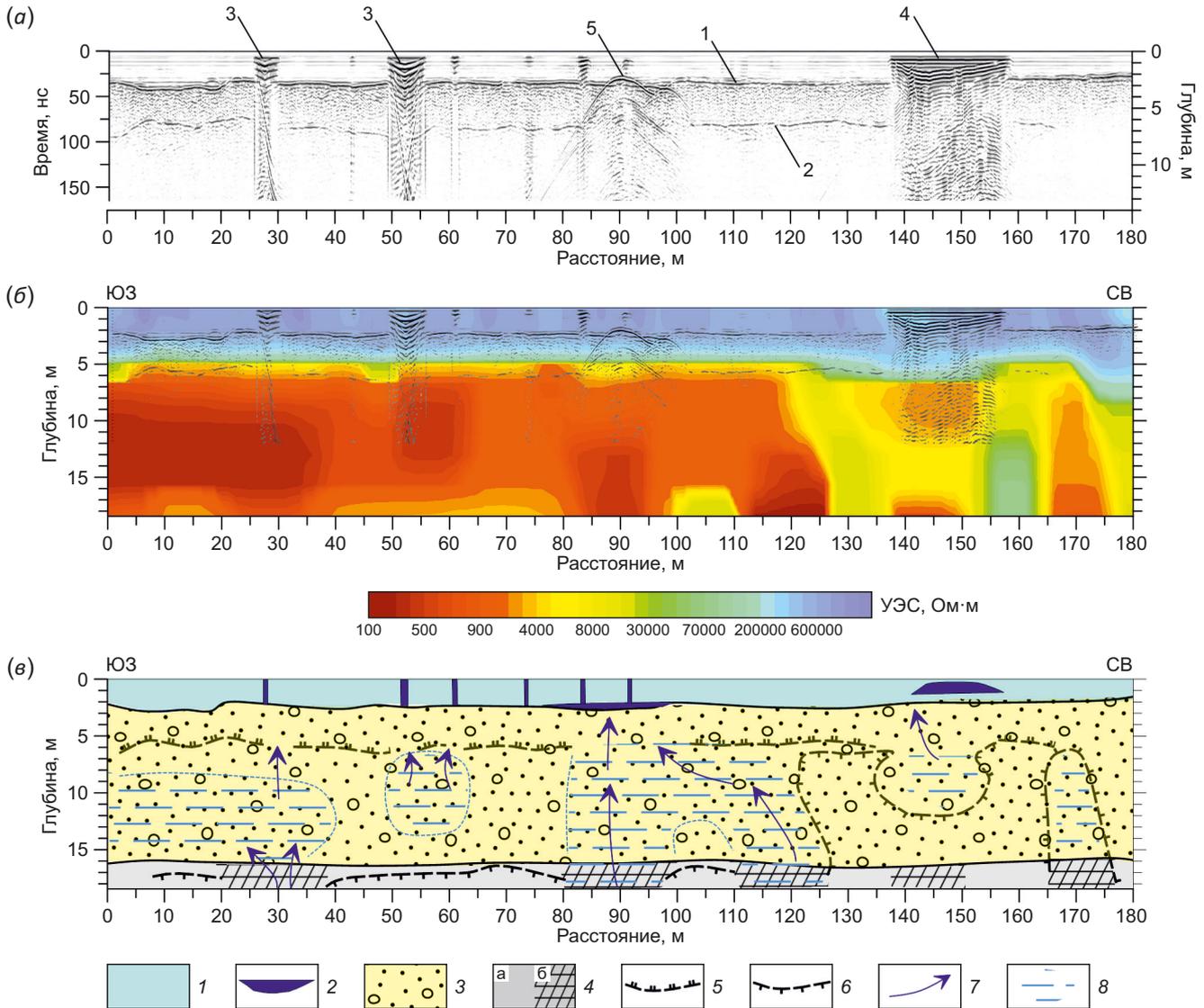


Рис. 6. Радараграмма (а), разрез УЭС пород по данным Д03-БИЭП (б) и их интерпретация (в) по фрагменту профиля № 6. (а): 1 – отражающая граница лед – аллювий; 2 – отражающая граница от подошвы сезонномерзлого слоя; 3 – аномалии в области трещин; 4 – аномальный отраженный сигнал в пределах ледяного бугра; 5 – гипербола дифракции в зоне разгрузки подземных вод под лед. (в): 1 – лед; 2 – вода; 3 – аллювий; 4 – породы коренные (а), трещиноватые по разлому (б); 5 – граница сезонного промерзания; 6 – граница ММП; 7 – предполагаемое направление движения подземных вод; 8 – обводненные породы по каналам фильтрации.

Fig. 6. Radarogram (a), rock resistivity section based on the ADS-NCEFMM-related data (b) and its interpretation (c) from the fragment of profile No. 6. (a): 1 – reflecting ice-alluvium boundary; 2 – reflecting boundary from the base of the seasonally frozen layer; 3 – abnormalities in the crack area; 4 – abnormally reflected signal within the ice mound; 5 – diffraction hyperbole in the zone of groundwater discharge under the ice. (c): 1 – ice; 2 – water; 3 – alluvium; 4 – bedrock rocks (a) fractured along the fault (b); 5 – boundary of seasonal freezing; 6 – permafrost boundary; 7 – expected direction of groundwater movement; 8 – rocks watered through filtration channels.

На этом же отрезке профиля № 6 проведены электрические зондирования по методике ДОЗ-БИЭП и в результате 2D инверсии построен геоэлектрический разрез, на который вынесены отражающие георадарные границы (рис. 6, б). Лед и сезонномерзлый аллювий выделяются слоем очень высокого УЭС, достигающего 800000 Ом·м. По данным ГРЛ толщина льда составила 2–3 м, а глубина сезонного промерзания аллювия – 2.8–3.8 м. Связь между толщиной льда и глубиной сезонного промерзания отсутствует. На геоэлектрическом разрезе между пикетами 0–125 м с глубины 5 м наблюдается уменьшение УЭС пород до 500–1000 Ом·м с локальными областями 350–450 Ом·м. Предполагается, что такие локальные области пониженного УЭС соответствуют каналам фильтрации подземных вод в талом аллювии.

С глубины около 17 м отмечается повышение УЭС, что интерпретируется как влияние кровли ММП на распределение электрического тока, поэтому на интерпретационном разрезе показано положение кровли многолетнемерзлых пород. Однако реальное положение кровли ММП может быть несколько иным (чуть глубже), так как в этом случае ограниченная глубинность зондирований не дает возможности уверенно выделить геоэлектрическую границу.

В северо-восточном окончании разреза в интервале пикетов 125–180 м УЭС пород преимущественно высокое, более 10000 Ом·м, что соответствует мерзлому состоянию. На 140–155 м под ледяным бугром на глубине 6–10 м выделяется локальная аномалия пониженного УЭС, интерпретируемая как промерзающий подрусловый талик. Анализ полученных данных показывает, что ледяной бугор сформировался в результате выжимания воды из талика на поверхность.

Между пикетами 80–100 м находятся две интенсивные гиперболы дифракции, которые, согласно анализу летних спутниковых снимков, попадают в русло реки. На этом участке также отмечается прерывание отражающей границы от подошвы слоя сезонного промерзания. Все вышеперечисленные признаки указывают на область разгрузки подземных вод из аллювия под

лед (рис. 6, в). Под предполагаемым каналом разгрузки ПВ на глубине 12–18 м выделяется вертикальная область низкого УЭС (рис. 6, б), которая может быть связана с обводненным разломом в коренных породах. Подобные вертикальные аномалии низкого УЭС выявлены на интервалах профиля 0–10, 25–35, 85–95, 115–125, 140–150, 165–175 м.

Возможно, наряду с горизонтальным стоком в аллювии существует и восходящая фильтрация по узким зонам тектонической трещиноватости в коренных породах. Однако авторы не могут уверенно интерпретировать вертикальные аномалии низкого УЭС на глубине как разломы, поскольку глубинности зондирования недостаточно, чтобы увидеть полную картину на фоне вмещающей среды. Можно отметить, что аномалия на радарограмме, интерпретируемая как канал разгрузки ПВ, пространственно совпадает с аномалией низкого УЭС в коренных породах (рис. 6, б).

Для верификации аномалии 25.03.2022 г. на пикете 90 м была пробурена скважина. С глубины 2.4 м были вскрыты напорные воды, а на 3.0 м – кровля аллювиальных отложений. Столб воды высотой около 0.25 м изливался в течение двух суток наблюдений, не снижая напора (Прил. 1 на странице статьи онлайн (видео от 26.03.2022 г. предоставлено Макарьевой О.М.)). С помощью кондуктометра Hanna HI98130 Combo были определены свойства воды и ее температура: электропроводность с точностью 2 % составила 52 мкСм/см (УЭС – 192 Ом·м), pH – 6.74, общая минерализация – 26 ppm. Температура воды в момент появления была равной –0.07 °С, но через некоторое время поднялась до +0.2 °С, однако эти вариации можно списать на погрешность прибора, которая по паспортным данным составляет ±0.5 °С.

4.3. Особенности строения участка разгрузки воды на наледь из ледяного бугра

На ключевом участке № 1 (см. рис. 1, б) в пределах ледяного бугра по данным ГРЛ в месте разгрузки воды на наледь установлено существенное сокращение глубины сезонного промерзания – с 4.5 м до 0 м (рис. 7).

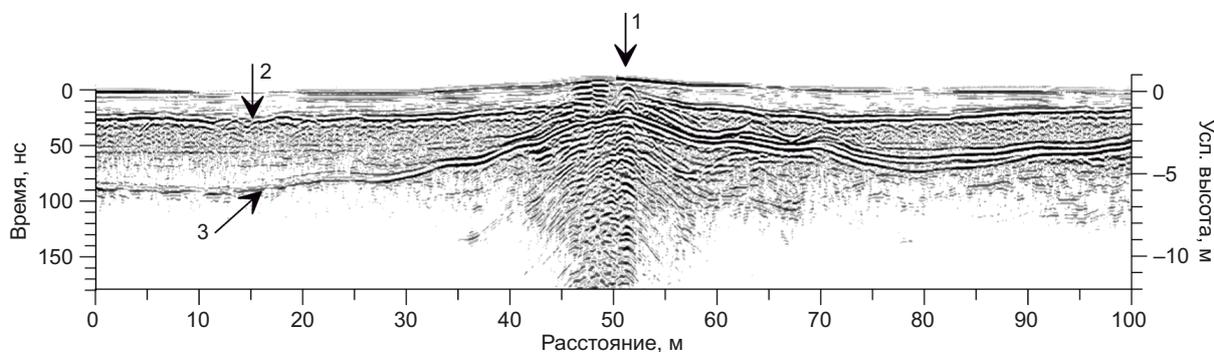


Рис. 7. Радарограмма через ледяной бугор. 1 – место выхода воды на наледь; 2 – граница лед – аллювий; 3 – граница сезонного промерзания.

Fig. 7. Radarogram across the ice mound. 1 – water outlet location on the ice; 2 – ice–alluvium boundary; 3 – boundary of seasonal freezing.

Радарограмма построена с учетом рельефа бугра, поэтому шкала глубины представляет собой условные высотные отметки. Канал разгрузки подземных вод в аллювии и обводненные песчано-галечниковые отложения выделяются на радарограмме повышенной интенсивностью отраженного сигнала.

Закономерно возник вопрос – что из себя представляет канал разгрузки? Является ли он вертикальной «трубой» или же это линейная структура вдоль русла.

Сопоставление ортофотоплана и карты глубины сезонного промерзания показало, что источник наледных вод расположен в одном из ветвящихся русел р. Анмангында (рис. 8). Наблюдается закономерное уменьшение глубины промерзания под руслом в виде

линейной аномалии пониженных значений $H_{смс}$. В то же время в месте формирования бугра отмечается область пониженных значений глубины сезонного промерзания овальной формы размером 5×15 м.

Это означает, что разгрузка ПВ, препятствующая сезонному промерзанию, происходит в ограниченной области и, вероятно, по вертикальному каналу. Кроме этого, выявлены локальные аномалии глубины сезонного промерзания меньших размеров (показаны стрелками на рис. 8, б). Предполагается, что в этих местах также происходит разгрузка ПВ в виде ключей, представляющих вертикальные восходящие потоки воды в аллювии.

Результаты электротомографии с незаземленными линиями по профилю, пересекающему ледяной бугор,

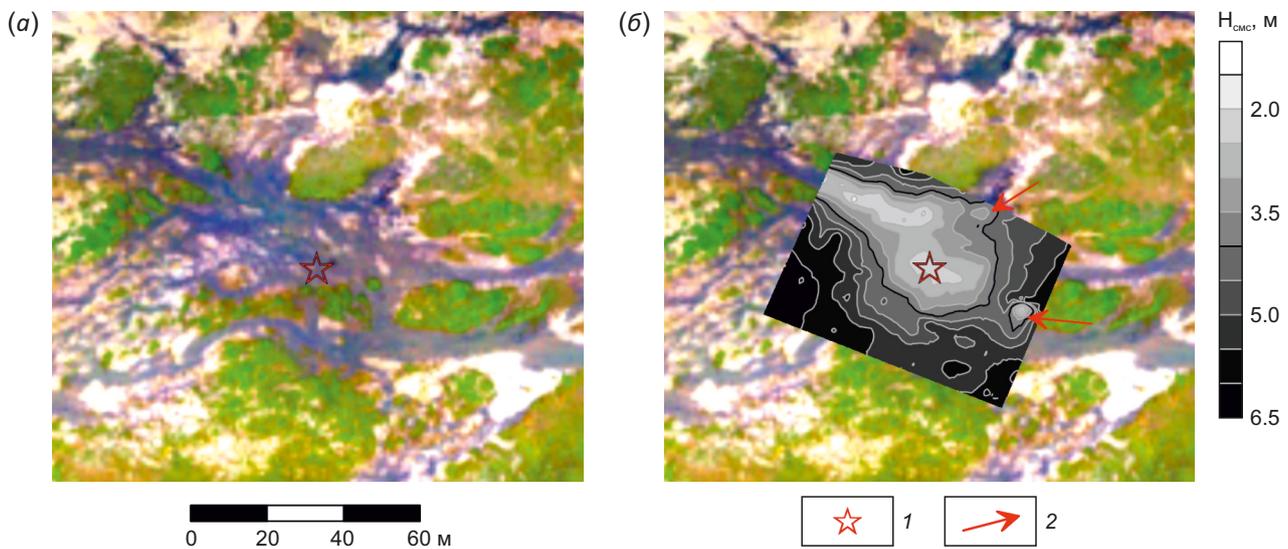


Рис. 8. Летний ортофотоплан участка формирования ледяного бугра (а) и карта глубины сезонного промерзания по данным георадиолокационной съемки 2022 г. (б). 1 – место формирования ледяного бугра и разгрузки воды на наледь; 2 – локальные аномалии глубины сезонного промерзания.

Fig. 8. Summer orthophotoplan of the ice mound formation site (a) and depth map of seasonal freezing based on the 2022 georadar survey data (b). 1 – place of ice mound formation and water outlet location on ice; 2 – local anomalies of seasonal freezing depth.

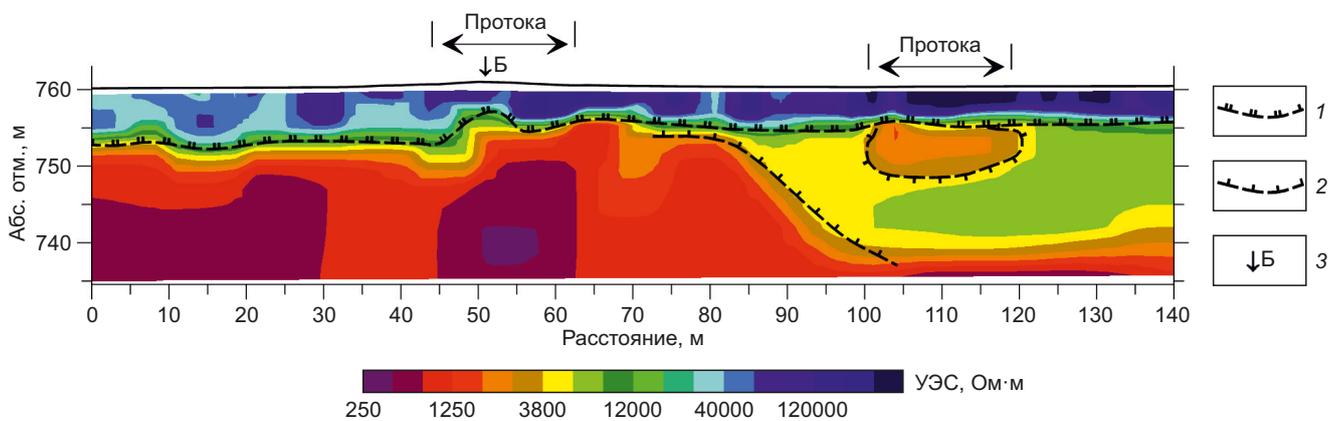


Рис. 9. Геоэлектрический разрез через наледь с элементами интерпретации по результатам 2D инверсии. 1 – граница сезонного промерзания; 2 – граница многолетнемерзлых пород; 3 – место разгрузки подземных вод на наледь из ледяного бугра.

Fig. 9. Geoelectric section across the aufeis with the elements of interpretation from 2D inversion results. 1 – boundary of seasonal freezing; 2 – boundary of permafrost rocks; 3 – ice mound locations as features of groundwater discharge.

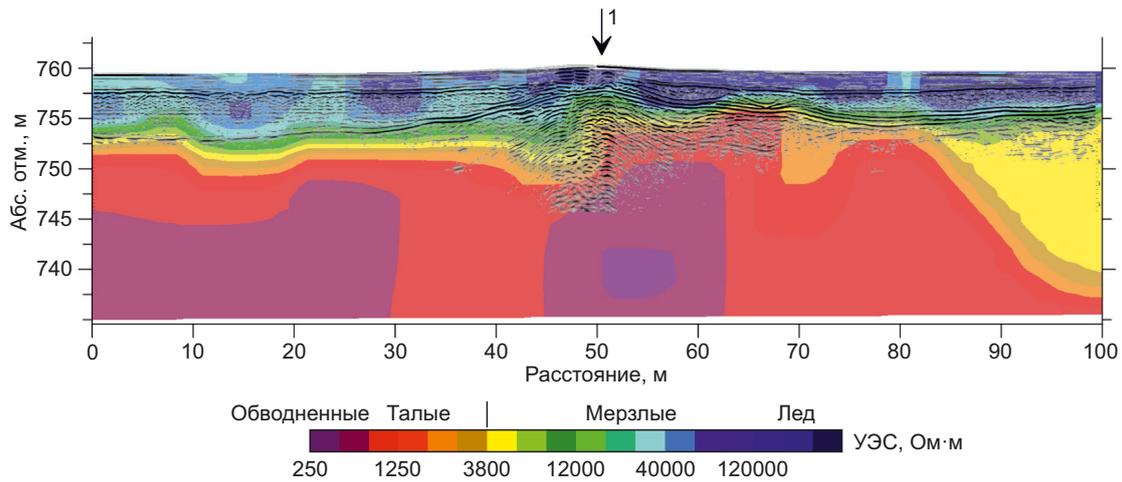


Рис. 10. Сопоставление радарограммы и геоэлектрического разреза по результатам 2D инверсии данных ДОЗ-БИЭП. 1 – место разгрузки подземных вод из ледяного бугра [Olenchenko et al., 2022].

Fig. 10. Comparison between the radarogram and the geoelectric section based on the results of 2D inversion for the ADS-NCEFMM-related data. 1 – location of groundwater discharge from the ice mound [Olenchenko et al., 2022].

показали, что лед и сезонно-мерзлый аллювий имеют очень высокое УЭС (рис. 9). У льда УЭС порядка 300000–600000 Ом·м. На участке разгрузки подземных вод на наледь с глубины 6–7 м УЭС аллювиальных отложений составляет порядка 1000 Ом·м с локальными аномалиями до 500–700 Ом·м, что означает талое состояние пород. В интервале профиля 100–130 м под протокой выделяется локальная аномалия низкого УЭС пород, интерпретируемая как промерзающий подрусловый талик.

При промерзании этого талика подземные воды выжимаются на поверхность по трещине во льду, которая проявляется в верхней части разреза УЭС в виде узкой вертикальной зоны пониженного УЭС в интервале профиля 100–105 м.

В основании мерзлого аллювия в интервале пикетов 90–140 м проявляется кровля слоя низкого УЭС, которая интерпретируется как мерзлые сланцы. Их проводимость даже в мерзлом состоянии существенно выше, чем электрическая проводимость перекрывающих аллювиальных отложений, за счет большого содержания незамерзшей воды в тонких капиллярах. Другая возможная причина высокой электропроводности сланцев – графитизация или пиритизация, которая широко распространена в коренных породах района исследований.

Под местом выхода подземных вод на лед (пикет 50 м) на геоэлектрическом разрезе с глубины 12 м отмечается локальная субвертикальная зона низкого УЭС шириной 18 м. Предполагается, что эта аномалия связана с каналом фильтрации подземных вод в аллювии. Ранее авторами было установлено, что каналы сосредоточенной фильтрации подземных вод в обводненных песчаных отложениях выделяются локальными низкоомными аномалиями, а в трехмерной геоэлектрической модели – в виде «трубы» с низким УЭС [Olenchenko et al., 2017]. Проследить связь этой аномалии

с разломами в коренных породах не представляется возможным из-за ограниченной глубинности зондирования.

Сопоставление геоэлектрического разреза и радарограммы показало удовлетворительное совпадение отражающих георадарных границ с границами пород разного УЭС (рис. 10). При этом над обводненными таликами, выделенными по УЭС, отмечается увеличение интенсивности отраженного сигнала.

Место образования ледяного бугра (место разгрузки ПВ на наледь) расположено над аномалией низкого УЭС, интерпретируемой как канал фильтрации подземных вод.

4.4. Особенности сезонного промерзания вдоль русла и образование линз воды внутри льда

На ключевом участке № 2 (см. рис. 1, б) по данным ГРЛ 2022 г. было установлено, что вдоль протоки реки отмечается сокращение глубины СМС с 4.0 до 2.0 м (рис. 11; Прил. 2). Кроме этого, случайно в толще льда была обнаружена локальная интенсивная аномалия отраженного сигнала, под которой не просматривалась граница сезонного промерзания.

В результате трехмерной инверсии данных БИЭП была построена объемная геоэлектрическая модель (рис. 12; Прил. 3). Высокоомным слоем с УЭС более 30000 Ом·м проявляется слой льда и мерзлый аллювий. Внутри высокоомного слоя (льда) выделяется локальная изометричная аномалия низкого УЭС диаметром около 6 м.

Интенсивное отражение георадарного сигнала и пониженное УЭС в зоне локальной аномалии были проинтерпретированы как линза незамерзшей воды (рис. 13). Бурение скважины на пикете 45 м подтвердило наличие линзы воды в интервале глубин 0.5–1.0 м. Вероятно, она образовалась, после того как перестал действовать один из каналов разгрузки наледных вод.

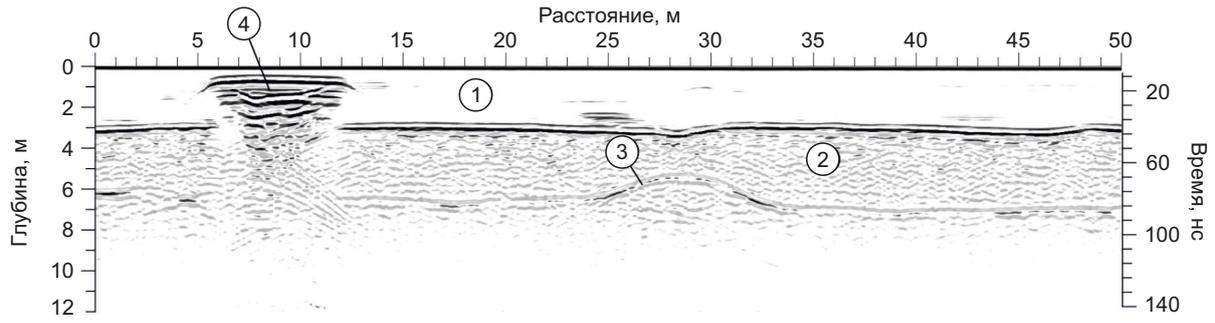


Рис. 11. Радарограмма по одному из профилей площадки № 2: 1 – лед; 2 – аллювий мерзлый; 3 – граница промерзания; 4 – локальная аномалия внутри льда.

Fig. 11. Radarogram on one of the profiles for site № 2: 1 – ice; 2 – frozen alluvium; 3 – freezing boundary; 4 – local abnormality inside the ice.

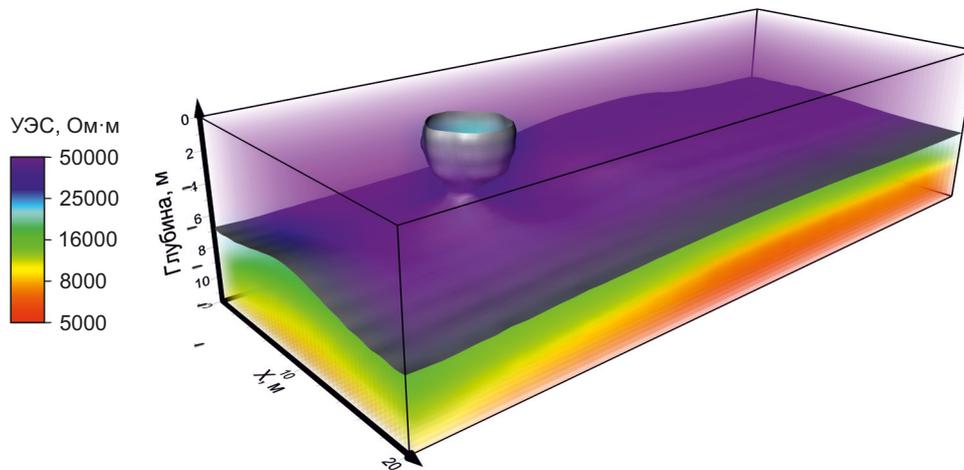


Рис. 12. Объемная геоэлектрическая модель по результатам 3D инверсии данных БИЭП.

Fig. 12. Volumetric geoelectric model based on the results of 3D inversion for the NCEFMM-related data.

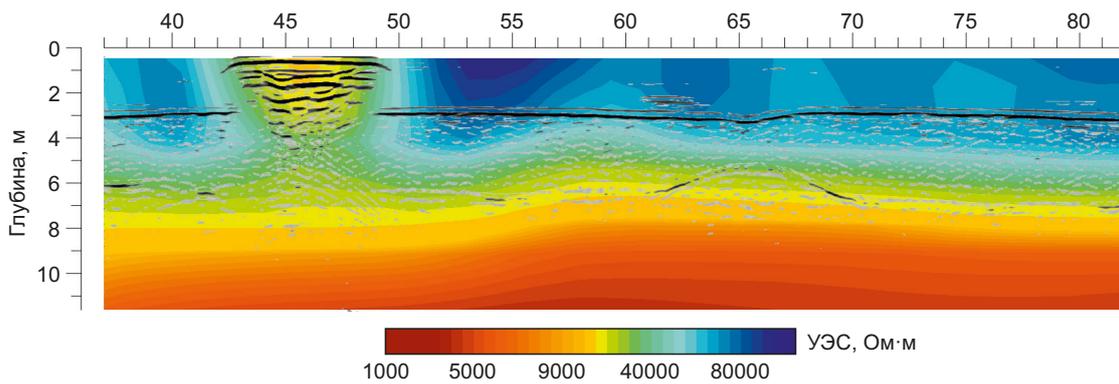


Рис. 13. Разрез УЭС по результатам 3D инверсии и радарограмма по профилю через линзу воды во льду.

Fig. 13. A resistivity cross-section based on the results of 3D inversion and a radarogram on the profile across the water lens in ice.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Интерпретация геофизических данных. С помощью комплексирования георадиолокации и бесконтактных измерений электрического поля установлено, что места разгрузки воды на наледь пространственно совпадают с аномалиями в виде гипербол дифракции на радарограммах в сочетании с зонами низкого

электрического сопротивления в аллювии или кровле коренных пород. Выделяется два типа аномалий низкого УЭС: первый – локальные изометричные поперечным размером до 20 м среди высокоомных пород, которые можно объяснить как промерзающие надмерзлотные талики. Второй тип аномалий низкого УЭС – локальные или протяженные по горизонтали области

среди пород пониженного УЭС, которые интерпретируются авторами как каналы фильтрации подземных вод в аллювиальных отложениях. В некоторых случаях такие аномалии совпадают с вертикальными зонами пониженного УЭС в коренных породах.

Вероятно, питание наледи осуществляется за счет вод аллювиального комплекса, который, в свою очередь, пополняется трещинно-пластовыми и трещинно-жильными водами коренных пород. Однако недостаточная глубинность зондирования методом БИЭП не позволила проследить вертикальные аномалии низкого УЭС в коренных породах на глубину. Анализ данных позволяет сделать осторожное предположение о возможном питании аллювия подземными водами из коренных пород по узким зонам трещиноватости. В пользу этой гипотезы говорят локальные изометричные или овальные в плане аномалии минимальной глубины СМС, которые, возможно, образуются в местах восходящих потоков в аллювии (ключей) от коренных пород.

Авторам неизвестны публикации, описывающие трехмерные электрические модели льда с включениями неоднородностей, поэтому полученные материалы можно считать уникальными. Обнаружение линзы незамерзшей воды внутри льда – пример того, что наледь – это высокодинамичная система, в которой появляются и затухают источники наледных вод. Прекращение деятельности источника может быть связано с падением давления в коллекторе за счет изменения гидрогеологических условий, например промерзания талика или уменьшения запасов воды в аллювии. Следовательно, на тех участках, где аллювиальный коллектор питается за счет глубинных трещинно-жильных вод, разгрузка воды на лед будет происходить постоянно. Вероятно, этим и объясняются локальные области максимальной толщины льда, маркирующие глубинные источники подземных вод.

Динамика толщины льда. Сравнение полученных данных о распределении толщины льда в 2021 и 1963 гг. [Bukaev, 1969] показывает, что наибольшая толщина льда сосредоточена в разных частях наледной поляны. По историческим наблюдениям первый максимум находился в средней (на перешейке), а второй – в верхней части наледи. Георадиолокационная съемка 2021 г. показала отсутствие льда на перешейке (см. рис. 3), максимальная толщина льда в верхней части наледи оказалась ниже исторических показателей в 1.3 раза. Данное наблюдение позволяет сделать вывод о том, что происходит смещение источников подземных вод и изменение общей конфигурации наледи.

Генезис Анмангындинской наледи. Споры о генезисе Анмангындинской наледи велись в период ее активного исследования. Одни предположения строились на анализе химического состава воды и дебита предполагаемого источника, расположенного выше наледи, и речных вод, формирующихся ниже наледи. В.М. Лебедев [Lebedev, 1969] сделал вывод о том, что главная роль в питании наледи принадлежит верхним

горизонтам грунтовых вод (надмерзлотным водам), которые в весенний и летний период пополняются за счет таяния снега и выпадения дождя. Они не имеют связи с межмерзлотными и подмерзлотными водами, в зимний период расходуются на поддержание подруслового потока.

Другим предположением стало то, что питание наледи на 90–92 % осуществляется за счет дебита глубинных вод. Оно сделано на основе натуральных наблюдений. Н.А. Букаевым [Bukaev, 1969] было замечено, что в июне в 1.5-метровой трещине наледного льда на тополе была зеленая листва, подтверждающая наличие талика под наледью. Он отметил также, что источник, находящийся на линии разлома в месте впадения ручья Солонцового (истор., Слипцового) в р. Анмангында, образован подмерзлотными водами, на это указывала постоянная положительная температура воды и распространение в районе выхода источника темно-зеленых водорослей, которые бурно развивались в течение всей зимы.

В работе [Romanovsky, 1983] на основе данных о дебите наледообразующих источников и измеренном объеме льда с ноября по март сделан вывод о том, что под Анмангындинской наледью и ниже находятся грунтово-фильтрационные талики с небольшим поперечным сечением, пропускная способность которых очень мала.

Вероятно, наледообразующие воды различного генезиса являются частью единой гидродинамической системы, поэтому определение генетической принадлежности гигантских наледей должно осуществляться с учетом динамики и характеристик водовыводящих таликов, каналов разгрузки подземных вод и процессов промерзания наледной поляны.

Результаты геофизических исследований, проведенных в 2021–2022 гг., показывают, что питание наледи главным образом осуществляется за счет выхода таликовых вод на поверхность льда. Однако не исключается дополнительное питание этих таликов глубинными водами.

Выводы будут проверены при помощи анализа изотопного состава воды, льда, атмосферных осадков, отобранных в пределах бассейна р. Анмангында.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате современных геофизических исследований и анализа фондовых материалов установлено, что в 2021 г. по сравнению с периодом 1963–1966 гг. объем наледи был меньше в 2.4 раза, а средняя толщина льда меньше на 17.7 %.

На радарограммах интенсивными гиперболами дифракции выделяются участки разгрузки подземных вод из аллювия под лед. Как правило, они расположены в руслах проток. Предполагается, что некоторые каналы связаны с глубинными источниками в коренных породах [Olenchenko et al., 2022].

Данные электротомографии показали, что многолетнемерзлая толща до глубины 20 м имеет сложное

строение с крупными и мелкими подрусовыми таликами. Каналы разгрузки подземных вод из промерзающих таликов выделяются аномалиями пониженного УЭС характерной формы.

Впервые по данным электрических зондирований получена объемная геоэлектрическая модель льда, в которой выделена линза незамерзшей воды. Такой результат не мог быть получен ранее с помощью контактных методов электроразведки из-за невозможности заземления в лед или индуктивных методов из-за высокого УЭС льда и воды. Только применение метода БИЭП с заземлением через емкостную связь позволило выявить неоднородное строение льда. Комплексование БИЭП и георадиолокации открывает большие перспективы для решения подобных гидрологических или гляциологических задач.

Геофизическими признаками источников наледи являются интенсивные гиперболы дифракции на радарограммах с узкими зонами многократных переломлений («звон»), сопровождающиеся локальными аномалиями пониженного до первых сотен Ом·м УЭС пород. Предполагается, что локальные аномалии УЭС изометричной формы соответствуют горизонтальным каналам фильтрации, узкие субвертикальные аномалии низкого УЭС соответствуют зонам дробления в коренных породах с восходящей фильтрацией подземных вод.

Необходимо проведение дополнительных исследований с применением геофизических методов, обладающих большей глубиной, а также заверка полученных данных с помощью бурения скважин для уточнения результатов 2021–2022 гг.

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

Alekseev V.R., Boyarintsev E.L., Dovbysh V.N., 2012. Long-Term Dynamics of the Anmangynda Aufeis under Climate Change. In: The Current Problems of Stochastic Hydrogeology and Flow Regulation. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference Dedicated to the Memory of A.V. Rozhdestvensky, an Outstanding Hydrologist (April 10–12, 2012). Moscow, p. 298–305 (in Russian) [Алексеев В.Р., Бояринцев Е.Л., Довбыш В.Н. Многолетняя динамика размеров Амангындинской наледи в условиях изменений климата // Современные проблемы стохастической

гидрологии и регулирования стока: Труды Всероссийской научной конференции, посвященной памяти выдающегося ученого-гидролога А.В. Рождественского (10–12 апреля 2012 г.). М., 2012. С. 298–305].

Alekseev V.R., Makarieva O.M., Shikhov A.N., Nesterova N.V., Ostashov A.A., Zemlianskova A.A., 2021. Atlas of Giant Aufeis-Tarynsin the Northeast Russia. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 302 p. (in Russian) [Алексеев В.Р., Макарьева О.М., Шихов А.Н., Нестерова Н.В., Осташов А.А., Землянскова А.А. Атлас гигантских наледей-тарынов северо-востока России. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2021. 302 с.].

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.].

Koreisha M.M., 1987. Regional Analysis of Genesis and Development of Aufeis. In: A Study of Frozen Grounds in Development Areas. Stroyizdat, Moscow, p. 49–57 (in Russian) [Корейша М.М. Региональный анализ генезиса и развития наледей // Исследование мерзлых грунтов в районах освоения. М.: Стройиздат, 1987. С. 49–57].

Lebedev V.M., 1969. Monitoring of Aufeis in the Anmangynda River Basin. In: Magadan GMO Collection of Works. Iss. 2. Kolyma UGMS, Magadan, p. 122–137 (in Russian) [Лебедев В.М. Стационарные наблюдения за наледью в бассейне реки Анмангынды // Сборник работ Магаданской ГМО. Магадан: Колымское УГМС, 1969. Вып. 2. С. 122–137].

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.

Makarieva O.M., Nesterova N.V., Ostashov A.A., Zemlianskova 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>.

Olenchenko V.V., Gagarin L.A., Khristoforov I.I., Kolesnikov A.B., Efremov V.S., 2017. The Structure of a Site with Thermo-Suffosion Processes within Bestyakh Terrace of the Lena

River, According to Geophysical Data. *Earth's Cryosphere XXI* (5), 14–23. DOI:10.21782/EC1560-7496-2017-5(14-23).

Olenchenko V.V., Makarieva O.M., Danilov K.P., Ostashov A.A., Kalganov A.S., Zemlianskova A.A., Khristoforov I.I., Nesterova N.V., 2022. Georadar and Electrical Survey Results for Giant Groundwater Aufeis in the Anmangynda River (Magadan Region). In: *Monitoring in the Cryolithozone. Collection of Reports of the Sixth Conference of Geocryologists of Russia with Participation of Russian and Foreign Scientists, Engineers and Specialists (June 14–17, 2022)*. University Book House, Dobrosvet, Moscow, p. 420–426 (in Russian) [Оленченко В.В., Макарьева О.М., Данилов К.П., Осташов А.А., Калганов А.С., Землянскова А.А., Христофоров И.И., Нестерова Н.В. Результаты георадиолокационных и электрических зондирований гигантской наледи подземных вод на р. Анмангында (Магаданская область) // Мониторинг в криолитозоне: Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов (14–17 июня 2022 г.). М.: Изд-во КДУ, Добросвет, 2022. С. 420–426].

Potapov V.V., Makarieva O.M., Olenchenko V.V., 2022. Geoelectric Structure of the Section of 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. Анманданда. Магадан: Колымское УГМС, 1977. 62 с.].

Romanovsky N.N., 1983. *Groundwater in the Cryolithozone*. MSU Publishing House, Moscow, 231 p. (in Russian) [Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны. М.: Изд-во МГУ, 1983. 231 с.].

Shvetsov P.F., 1951. *Groundwater of the Verkhoyansk-Kolyma Folded Area and Specific Features of Its Manifestation Related to Low Permafrost Temperatures*. Publishing House of the USSR Academy of Science, Moscow, 279 p. (in Russian) [Швецов П.Ф. Подземные воды Верхоянско-Колымской горноскладчатой области и особенности их проявления, связанные с низкотемпературной вечной мерзлотой. М.: Изд-во АН СССР, 1951. 279 с.].

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.].

Terry N., Grunewald E., Briggs M., Gooseff M., Huryn A.D., Kass M.A., Tape K.D., Hendrickson P., Lane J.W.Jr., 2020. Seasonal Subsurface Thaw Dynamics of an Aufeis Feature Inferred from Geophysical Methods. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 125 (3), e2019JF005345. <https://doi.org/10.1029/2019jF005345>.

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.].

Zemlianskova A.A., Alekseev V.R., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V., Makarieva O.M., 2023 (in press). Long-Term Dynamics of the Giant Anmangynda Aufeis in the Northeast Russia (1962–2021). In: *Ice and Snow (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.) // Лед и снег. 2023 (в печати)].

Zemlianskova A.A., Makarieva O.M., Shikhov A.N., Nesterova N.V., Ostashov A.A., Alekseev V.R., 2022. Long-Term and Intra-Annual Dynamics of the Anmangynda Aufeis (Magadan Region). In: *Monitoring in the Cryolithozone. Collection of Reports of the Sixth Conference of Geocryologists of Russia with Participation of Russian and Foreign Scientists, Engineers and Specialists (June 14–17, 2022)*. University Book House, Dobrosvet, Moscow, p. 450–455 (in Russian) [Землянскова А.А., Макарьева О.М., Шихов А.Н., Нестерова Н.В., Осташов А.А., Алексеев В.Р. Многолетняя и внутригодовая динамика Анмангындинской наледи (Магаданская область) // Мониторинг в криолитозоне: Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов (14–17 июня 2022 г.). М.: Изд-во КДУ, Добросвет, 2022. С. 450–455].

Zonov B.N., 1944. *Aufeis and Polynyas in the Rivers of the Yana-Kolyma Upland*. In: *Transactions of the Obruchev Permafrost Institute of the USSR Academy of Sciences*. Vol. 44. Publishing House of the USSR Academy of Science, Moscow, p.33–92 (in Russian) [Зонов Б.В. Наледи и полыньи на реках Янско-Колымской горной страны // Труды Института мерзлотоведения им. В.А. Обручева АН СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1944. Т. 4. С. 33–92].