



ГЛУБИНА СЕЗОННОГО ПРОМЕРЗАНИЯ ПОРОД НАЛЕДНОЙ ПОЛЯНЫ В ДОЛИНЕ Р. АНМАНГЫНДА И ЕЕ СВЯЗЬ С ТОЛЩИНОЙ НАЛЕДИ

✉ Землянскова А.А.¹, Макарьева О.М.¹, Оленченко В.В.²

¹ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

✉ anastasiazemlanskova@gmail.com

Наледи включены в число самых опасных природных явлений России. Их исследования с целью выявления факторов и динамики формирования являются актуальной задачей. Объект исследования – гигантская наледь подземных вод в долине р. Анмангында, которая находится в 30 км от пос. Усть-Омчуг. В течение трех полевых сезонов в 2021, 2024 и 2025 гг. проводились геофизические исследования с целью изучения строения наледи, выявления границ сезонного промерзания пород, каналов разгрузки подземных вод и оценки толщины льда. Работы выполнены с помощью георадара ОКО с антенным блоком центральной частоты 250 МГц. Установлено, что в период максимального развития наледи (апрель месяц) толщина льда достигала значений 4.2–6.7 м при площади 3.7–4.3 км². Глубина сезонного промерзания имеет трехмодальное распределение с медианными значениями 2.4 м, 4.0 м и 5.1 м. Была рассмотрена связь толщины наледного льда и глубины промерзания. Анализ показал, что до достижения толщины льда 2 м наблюдается прямая связь, а свыше этого значения – обратная. Особые гидротермальные условия наледных полей изучены слабо, поэтому данное исследование представляет интерес для широкого круга специалистов.

Ключевые слова: *Анмангындинская наледь, криолитозона, георадиолокационное зондирование, сезонное промерзание, мерзлота*

Наледи — это специфическая форма сезонного оледенения, образующаяся в виде больших ледяных участков в долинах рек, которая характерна для территорий, где распространена многолетняя мерзлота [Ensom и др., 2022]. Площадь наледей может измеряться десятками квадратных километров, а толщина льда достигать 10–12 м. Распределение наледей тесно связано со структурой рельефа, с его расчленением и морфологическими особенностями речных долин в регионе.

Сезонная и многолетняя изменчивость наледей, сопутствующие криогенные и посткриогенные геолого-геоморфологические явления оказывают значительное влияние на окружающую среду и криогенные процессы, происходящие в пределах наледных полей [Алексеев, 2015]. Скорость формирования и таяния льда оказывает влияние на подстилающую поверхность, называемую наледной поляной. В результате сезонного промерзания отложений создаются преграды на пути грунтового потока, что способствует выходу воды на поверхность из-за нарастающего давления, что и способствует формированию наледей [Романовский, 1973]. Первые работы по изучению процесса наледообразования были опубликованы еще в 19 веке, однако мерзлотно-гидрогеологическое строение наледных полей изучено не в полной мере.

Одним из методов изучения строения наледей является георадиолокация (ГРЛ) [Terry et al., 2020; Liu et al., 2021]. Он позволяет установить конфигурацию и мощность мерзлых толщ, границы таликовых зон, изучить строение наледей, выделить локальные объекты [Оленченко и др., 2023; Едемский и др., 2025].

Данная работа направлена на изучение влияния толщины наледи на глубину промерзания отложений наледной поляны.

Объектом исследования выбрана Анмангындинская наледь, ежегодно формирующаяся в долине одноименной реки. По историческим данным её максимальные размеры составляли 6.8 км² (1978 г.) по площади и 11.7 млн м³ (1967 г.) в объеме, а толщина льда в отдельных точках достигала 6–8 м. Для бассейна р. Анмангында характерно повсеместное распространение многолетней мерзлоты мощностью от 100 до

450 м, иногда прерывающейся в таликовых зонах. Геологическое строение представлено осадочными породами верхнего триаса, юры и мела [Землянскова и др., 2023].

Исследования проведены с помощью георадара ОКО с антенным блоком на центральную частоту 250 МГц. Измерения проводились весной 2021, 2024 и 2025 гг. Шаг зондирования по профилям составлял 0.05 м. Обработка данных осуществлялась с помощью программного обеспечения GeoScan32. На каждом профиле определялась глубина отражающей границы от поверхности земли и подошвы слоя сезонного промерзания.

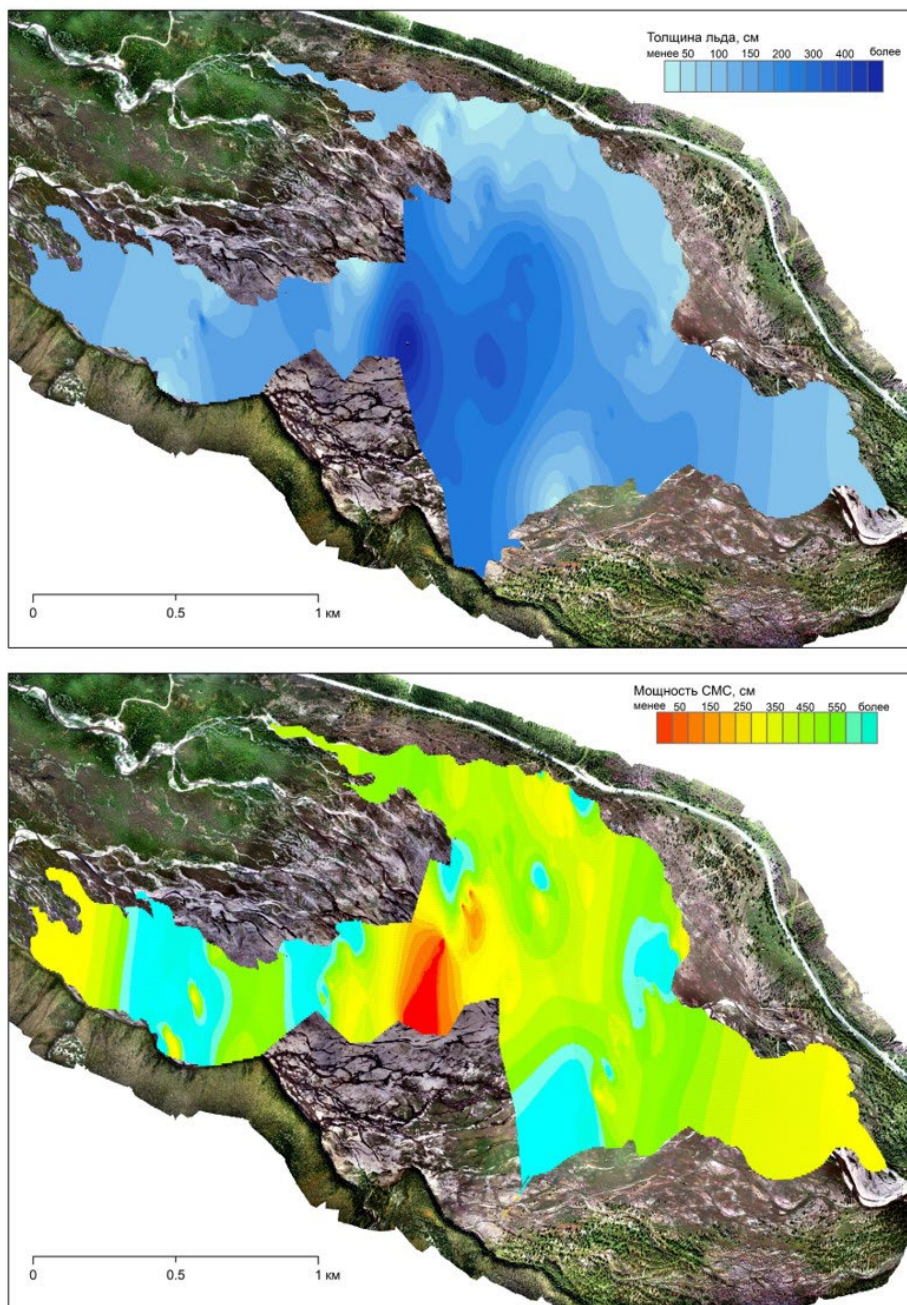


Рис. 1. Схемы распределения толщины льда Анмангындинской наледы и мощности сезонно-мерзлого слоя пород наледной поляны по результатам ГРЛ съемки, апрель 2024 г.

Для исследования особенностей промерзания пород было проведено зонирование наледной поляны, отражающее условия на её поверхности. С помощью беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 4 pro v.2 была выполнена съемка наледной поляны в летний период, а после составлен ортофотоплан. С помощью инструментов ArcMap ортофотоплан был обработан и наледная поляна была разделена на зоны: речная сеть,

границы активного многолетнего формирования наледи (участки без растительности, представленные аллювием), зона развития кустарничков, а также залесенные участки.

Для оценки влияния условий поверхности наледной поляны на условия промерзания и образования наледи были проанализированы данные георадиолокационной съемки за 2021 г. Связь между толщиной наледи и глубиной сезонного промерзания была оценена с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена r_s , уровень значимости $p < 0.05$.

Различные поверхностные условия, в том числе и разная толщина льда, влияют на глубину сезонного промерзания, на температурный режим и фазовые переходы воды в толще пород [Алексеев, 2015]. На схеме за 2024 г. (рис. 1) показано, что в пределах участков формирования наледи общая глубина промерзания достигает 5 м и более, что приводит к промерзанию каналов фильтрации и формированию в надмерзлотных таликах высокого давления воды с последующим ее изливом на поверхность. Участки с минимальным сезонным промерзанием находятся в зонах активной фильтрации подземных вод.

Неравномерность формирования наледи и сложный механизм ее образования приводят к неравномерному промерзанию отложений. Внутри ледяной толщи и под ней может циркулировать поток грунтовых вод, который уменьшает связь между температурой воздуха и подстилающей поверхностью. На участках, где наледь образуется позже всего, долгое время лежит снег. После насыщения водой и кристаллизации под воздействием отрицательных температур становится наледью. Образовавшийся лед усиливает связь между температурой воздуха и подстилающей поверхностью. Одной из особенностей также является наличие таликовых зон, которые за счет тепловой энергии уменьшают глубину промерзания.

На наледной поляне, которая включает в себя все выделенные нами зоны, до толщины льда 2.0 м глубина промерзания меняется в широких пределах – от 1 до 5 и более метров, при толщине льда свыше 2.5 м разброс значений сокращается. Чем больше толщина льда, тем меньше промерзание. На участках представленные аллювием при увеличении толщины льда на 1 м промерзание отложений увеличивается на 0.39 м, на участках, где произрастают кустарнички – на 0.60 м. При достижении наледью 3 м и более глубина промерзания уменьшается. На залесенных участках наледной поляны связь не установлена.

Табл. 1. Уравнения регрессии для определения глубины сезонного промерзания в зависимости от толщины наледи

Тип зоны наледной поляны / Толщина льда, м	до 2–2.5	более 2.5
Наледная поляна	$y = 0.34x + 3.86$ $R^2 = 0.94$ $r_s = 0.16$	$y = 6.45 - 0.77x$ $R^2 = 0.82$ $r_s = -0.61$

где x – толщина наледи в метрах, y – глубина сезонного промерзания в метрах, r_s – коэффициент ранговой корреляции Спирмена при уровне значимости $p < 0.05$.

В границах речной сети, где толщина льда менее 2.0 м, глубина сезонного промерзания увеличивается на 0.96 м с каждым метром льда, при толщине льда более 2.0 м – уменьшается на 0.78 м. Процесс обусловлен выходом подземных вод под ледяной покров реки, что меняет структуру и форму наледи. Во время выхода воды температура повышается, сокращая глубину промерзания до минимума. Вода, изливаясь на поверхность, замерзает, создавая дополнительный ледяной слой. После прекращения выхода воды отложения наледной поляны вновь начинают промерзать.

Результаты исследования могут быть использованы для расчетов глубины сезонного промерзания при проектировании сооружений и инфраструктуры в районах распространения многолетнемерзлых пород в целях минимизации рисков повреждения

инфраструктуры от процессов наледеобразования. Для понимания механизмов формирования наледи необходимы длительные режимные наблюдения за динамикой геокриологических условий и изучение их связей с режимом гидрометеорологических параметров.

ЛИТЕРАТУРА

Алексеев В.Р. Подземные льды и гидротермическое движение грунтов на наледных участках речных долин // Лёд и Снег. 2015. Т. 55. № 1. С. 69-88. doi: 10.15356/2076-6734-2015-1-69-88

Едемский Д.Е., Тумской В.Е., Прокопович И.В. Георадиолокационное зондирование наледей и аллювия наледных полей в долине р. Кюбюме, Оймяконское нагорье // Лёд и Снег. 2025. Т. 65. №1. С. 135–147. doi: 10.31857/S2076673425010103

Землянскова А.А., Алексеев В.Р., Шихов А.Н., Остахов А.А., Нестерова Н.В., Макарьева О.М. Многолетняя динамика гигантской Анмангындинской наледи на Северо-Востоке России (1962–2021 гг.) // Лед и снег. 2023. Т. 63. №1. С. 71–84. doi: 10.31857/S2076673423010167

Оленченко В.В., Макарьева О.М., Землянскова А.А., Данилов К.П., Остахов 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. С. 1–15. doi: 10.5800/GT-2023-14-3-0702

Поморцев О.А., Кашкаров Е.П., Попов В.Ф. Наледи: глобальное потепление климата и процессы наледеобразования (ритмическая основа долгосрочного прогноза) // Вестник Якутского государственного университета. 2010. Т. 7. № 2. С. 40–48.

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

Ensom T.P., Makarieva O.M., Morse P.D., Kane D.L., Alekseev V.R., Marsh P. The distribution and dynamics of aufeis in permafrost regions // Permafrost and Periglacial Processes. 2020. Vol. 31. Is. 3. P. 383–395. doi: 10.1002/ppp.2051

Liu W., Fortier R., Molson J., Lemieux J-M. A conceptual model for talik dynamics and icing formation in a river floodplain in the continuous permafrost zone at Salluit, Nunavik (Quebec), Canada // Permafrost and Periglacial Processes. 2021. Vol. 32. Is. 3. P. 468-483. doi: 10.1002/ppp.2111

Terry N., Grunewald E., Briggs M. et al. Seasonal subsurface thaw dynamics of an aufeis feature inferred from geophysical methods // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2020. Vol. 125. Is. 3, e2019JF005345. doi: 10.1029/2019JF005345

THE SEASONAL FREEZING DEPTH OF THE SEDIMENTS OF THE ANMANGYNDA AUFEIS GLADE AND ITS CORRELATION TO THE ICE THICKNESS

Zemlianskova A.A.¹, Makarieva O.M.¹, Olenchenko V.V.²

¹ State hydrological institute, St. Petersburg, Russia

² Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Novosibirsk, Russia

Aufeis is one of the most dangerous natural phenomena in Russia. Their research in order to identify the factors and dynamics of formation is an urgent task. The object of the study is a giant groundwater aufeis in the valley of the Anmangynnda river, which is located 30 km from the Ust-Omchug (Magadan region). During three field seasons in 2021, 2024 and 2025, geophysical studies were conducted to study the structure of the aufeis, identify the boundaries of seasonal sediments freezing, groundwater discharge channels and assess the thickness of the ice. The work was carried out using an OKO ground-penetrating radar with an antenna unit of a central frequency of 250 MHz. It was found that during the period of maximum aufeis formation (April), the ice thickness reached values of 4.2-6.7 m with an area of 3.7-4.3 km². A three-modal

distribution of seasonal freezing depth with median values of 2.4 m, 4.0 m and 5.1 m is highlighted. The correlation between the thickness of the aufeis thickness and the freezing depth was considered. The analysis showed that before reaching the ice thickness of 2 m, there is a direct relationship, and above this value, the opposite is true. The special hydrothermal conditions of aufeis glades have been poorly studied, so this research is of interest to a wide range of specialists.

Keywords: *Anmangynda aufeis, cryosphere, GPR, freezing depth, permafrost*

REFERENCES:

- Alekseev V.R.* Ground ice and hydrothermal ground motions on aufeis plots of river valleys // *Ice and Snow*. 2015. Vol. 55. Is. P. 69–88 (in Russian). doi: 10.15356/2076-6734-2015-1-69-88
- Edemsky D.E., Tumskoy V.E., Prokopovich I.V.* GPR sounding of aufeis and alluvium of aufeis glades in the Kyubyume River valley, Oymyakon Highlands // *Ice and Snow*. 2025. Vol. 65. Is. 1. P. 135–147. (in Russian). doi: 10.31857/S2076673425010103
- Zemlianskova A.A., Alekseev V.R., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V., Makarieva O.M.* Long-term dynamics of the huge Anmangynda aufeis in the North-East of Russia (1962–2021) // *Ice and Snow*. 2023 Vol. 63. Is. 1. P. 71–84. (in Russian). doi: 10.31857/S2076673423010167
- Olenchenko V.V., Makarieva O.M., Zemlyanskova A.A., Danilov K.P., Ostashov A.A., Kalganov A.S., Nesterova N.V., Khristoforov I.I.* Geophysical features of sources of giant aufeis on the Anmangynda river (Magadan region) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2023. Vol. 14. No. 3. P. 1–15. (in Russian). doi: 10.5800/GT-2023-14-3-0702
- Pomorseev E.P., Kashkarov V.F., Popov V.F.* Ice field: global warming and processes of ice formation (rhythmic basis of long-term prognosis) // *Vestnik Yakut. Gos. un-ta [Vestnik of Yakut State University]*. 2010. Vol. 7. №2. P. 40–48. (in Russian).
- Romanovsky N.N.* About geological activity of aufeis // *Merzlotnye issledovaniya*. 1973. Is. 13. P. 66–89.
- Ensom T.P., Makarieva O.M., Morse P.D., Kane D.L., Alekseev V.R., Marsh P.* The distribution and dynamics of aufeis in permafrost regions // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2020. Vol. 31. Is. 3. P. 383–395. doi: 10.1002/ppp.2051
- Liu W., Fortier R., Molson J., Lemieux J-M.* A conceptual model for talik dynamics and icing formation in a river floodplain in the continuous permafrost zone at Salluit, Nunavik (Quebec), Canada // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2021. Vol. 32. Is. 3. P. 468–483. doi: 10.1002/ppp.2111
- Terry N., Grunewald E., Briggs M. et al.* Seasonal subsurface thaw dynamics of an aufeis feature inferred from geophysical methods // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2020. Vol. 125. Is. 3, e2019JF005345. doi: 10.1029/2019JF005345