

УДК 551.328:551.324

## МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ГИГАНТСКОЙ АНМАНГЫНДИНСКОЙ НАЛЕДИ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ РОССИИ (1962–2021 гг.)

© 2023 г. А. А. Землянкова<sup>1,\*</sup>, В. Р. Алексеев<sup>2</sup>, А. Н. Шихов<sup>3</sup>,  
А. А. Осташов<sup>1,2,4</sup>, Н. В. Нестерова<sup>1,4</sup>, О. М. Макарьева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

<sup>3</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

<sup>4</sup> Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: anastasiazemlanskova@gmail.com

Поступила в редакцию 13.06.2022 г.

После доработки 19.08.2022 г.

Принята к публикации 06.03.2023 г.

Приводятся материалы о многолетней и сезонной изменчивости морфометрических характеристик гигантской наледи в долине реки Анмангында на Северо-Востоке России. Показано, что за последние 60 лет максимальная площадь тарына сократилась на 25%, а объём на 33%. Период абляции ледяного массива уменьшился на 34 дня, наледь из разряда перелетовывающей перешла в категорию сезонных образований.

**Ключевые слова:** гигантские наледи (тарыны), динамика наледей, сезонное оледенение, изменение климата, Анмангындинская наледь

DOI: 10.31857/S2076673423010167, EDN: INRTPO

### ВВЕДЕНИЕ

Наледи подземных вод – своеобразная форма сезонного, а в ряде мест и многолетнего конжеляционного оледенения земной поверхности. Они давно привлекают внимание исследователей и специалистов-практиков, прежде всего, как естественные ресурсы воды и льда, индикаторы водообменных циклов и опасные явления природы. Основная часть гигантских наледей-тарынов расположена в горных районах криолитозоны, поэтому их изучение сопряжено с большими трудностями. В региональном масштабе оно возможно лишь с помощью дистанционных методов исследования.

Первая крупномасштабная работа по систематизации сведений о гигантских наледях проведена в 1940–1950 гг. на Северо-Востоке СССР. В её задачи входили: аэровизуальная съёмка территории; дешифрирование наледей по собранному материалу; определение размеров наледных полей и их характеристик (площадь, длина, ширина, площадь льда на дату снимка); картирование полученных материалов. Окончательно работа завершена и опубликована в 1958 г. А.С. Симаковым и З.Г. Шильниковской в виде карты и кадастра наледей Северо-востока СССР, в которых помещена информация о 7448 ледяных массивах

площадью от 0.01 до 81.1 км<sup>2</sup> (Симаков, Шильниковская, 1958; Шильниковская, 1958). Эти материалы сыграли важную роль в оценке ресурсов подземных вод Северо-Востока, связи динамики формирования наледей с многолетней мерзлотой, рельефом, речной сетью, метеорологическими условиями и другими факторами (Гидрогеология..., 1972; Толстихин, 1974; Соколов, 1975; Корейша, 1991). В монографиях “Гидрогеология СССР” приведена оценка запасов подземных вод для разных территорий, основанная в том числе на данных об объёмах наледей подземных вод (Гидрогеология..., 1972). Так, динамические запасы наледного льда, образующегося при намораживании родниковых вод на территории России, оцениваются в 50 км<sup>3</sup> (Алексеев и др., 2021), что составляет 45 км<sup>3</sup> воды. Эта величина соизмерима с объёмом крупнейших по площади водохранилищ в стране. Актуален вопрос уточнения наледных ресурсов в современном климате, в том числе, на основе натуральных наблюдений.

Изучению наледей посвящено множество работ, как российских, так и зарубежных, но большинство полевых наблюдений ограничиваются единичным обследованием ледяного поля, некоторые работы продолжаются в течение 3–5 лет (Шульгин, 1968; Шепелев, 1972–1973; Кравчен-

ко, 1981; Yoshikawa, 2007, Gagarin et al., 2020). Это связано со сложностью их реализации в суровых климатических условиях. Результаты исследований составляют сведения о площади оледенения, рядах метеорологических данных, анализ проб воды и льда на гидрохимический и изотопный состав. Ключевые параметры – дебит источников, формирующих наледь и объём образовавшегося льда часто остаются неизученными, хотя и представляют значительный интерес. Эти сведения могут применяться для расчета запасов подземных вод, оценки роли наледей в формировании речного стока и других задач.

Анмангындинский тарын – единственный в мире наледный полигон, где динамика наледных процессов изучалась в течение 30 лет, начиная с 1962 г. В отдельные годы ледяной массив перелетывал, то есть часть льда не стаивала и включалась в очередной цикл намораживания. По своим морфологическим характеристикам и условиям формирования тарын признан репрезентативным для всей горной части Северо-Востока России (Толстихин, 1974). Наблюдения на полигоне проводились сотрудниками специально созданной гидрографической партии Колымского управления Гидрометеорологической службы СССР (Магадан). Основная цель исследований в указанный период заключалась в изучении процессов наледного регулирования подземного и речного стока. Для этого измерялись площадь и объём наледи, уровень и расход воды в створах выше и ниже наледной поляны, отбирались пробы воды на гидрохимический анализ, фиксировались сопутствующие мерзлотные явления. Материалы многолетних наблюдений обобщены в работах (Букаев, 1969; Лебедев, 1969; Лебедев, Ипатьева, 1980, Алексеев и др., 2012; Бояринцев, 2015). Однако характерные черты внутригодовой динамики в исторический период и многолетней изменчивости тарына в современном климате остаются неосвещенными. Между тем возникла острая необходимость применения этих данных и продолжения работ для оценки наледных ресурсов региона и их влияния на водообменные циклы в криолитозоне, подстилающие горные породы и криогенные ландшафты в целом.

В последние 20–25 лет разработаны более совершенные методы дистанционных и наземных исследований, усовершенствовалась приборная база и пр. Появилась возможность применения серийных космических снимков, беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) (Gagarin et al., 2020), радиолокационных съёмок (Terry et al., 2020; Liu et al., 2021) и пр. Все это побудило авторов статьи возобновить режимные наблюдения за развитием Анмангындинской наледи на новом информационно-технологическом уровне (Markarieva et al., 2021).

Задачи работы – формирование базы данных морфометрических характеристик Анмангындинской наледи с применением исторических материалов из первичных источников за период с 1962 по 2021 г., результатов анализа данных дистанционного зондирования (2000–2021) и собственных полевых исследований (2020–2021); проведение сравнительного анализа полученных данных, оценка сезонной и многолетней динамики наледи за период с 1962 по 2021 г. и обнаружение соотношений морфометрических показателей тарына и их изменчивость в течение последних шестидесяти лет.

## УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ АНМАНГЫНДИНСКОЙ НАЛЕДИ

Анмангындинская наледь расположена в бассейне одноименной реки (на современных картах она называется Анманндя), впадающей в р. Детрин, правый приток р. Колымы. По историческим данным, площадь наледи в период максимального развития достигала 6,8 км<sup>2</sup>. Это один из самых крупных тарынов Магаданской области, в непосредственной близости которого пролегает Тенькинская автомобильная дорога, обеспечивающая круглогодичный доступ к объекту исследования. Ближайший населенный пункт – пос. Усть-Омчуг, где более 70 лет функционирует метеорологическая станция, в 30 км от наледного полигона.

Бассейн р. Анмангынды располагается в пределах Охотско-Колымского нагорья, в замыкающем створе ниже наледной поляны “159 км Тенькинской трассы”, занимает площадь 376 км<sup>2</sup> с абсолютными высотами от 700 до 1850 м. От истока на протяжении 17 км река течёт на север, слабо изгибаясь в узкой, шириной 300–700 м долине, затем резко поворачивает на северо-запад и в середине прямого 15-километрового участка шириной 1200–2000 м разбивается на сеть мелководных ветвящихся проток, дренирующих современную наледную поляну.

Территория бассейна сложена осадочно-метаморфическими горными породами верхнего триаса, юры и мела, которые в депрессиях рельефа перекрыты толщей четвертичных валунно-галечных и песчано-щебенистых отложений. Большая часть их проморожена до глубины 100–300 м. Тапки формируются под руслами рек (Букаев, 1969).

Территория исследования характеризуется суровым, резко континентальным климатом. По данным метеорологической станции Усть-Омчуг (1967–2021 гг.), температура воздуха в наиболее холодные месяцы (декабрь–январь) составляет –35...–40°C с абсолютным минимумом –57°C, в тёплые (июль) 11,7°C с абсолютным мак-

симумом 33.6°C. Осадки выпадают неравномерно, среднемесячная сумма в мае, июне, июле и августе составляет 23, 49, 60 и 65 мм соответственно, средняя годовая достигает 342 мм (Метеорологический..., 2021).

Площадь Анмангындинской наледной поляны, по современным оценкам, составляет 7.6 км<sup>2</sup> (2% от площади водосбора 376 км<sup>2</sup>) (Makarieva et al., 2021), по данным Кадастра (Шильниковская, 1958) – 8.65 км<sup>2</sup>. Рельеф наледного ложа плоский, слабонаклонный, средняя абсолютная высота – 750 м. Наледь формируется в виде двух округлых ледяных массивов, соединенных небольшим пещейком. Мощность верхнего массива перед началом снеготаяния достигает 4–5 м, нижнего – 2.0–2.5 м. Происхождение питающих наледь родников до сих пор не выяснено.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Динамика Анмангындинской наледы изучалась на основе данных, полученных в исторический и современный периоды. Наблюдения гидрографической партии Колымского УГМС представлены в отчетах за 1962–1991 гг. (НТО..., 1967 г.; Отчёт..., 1977 г.; Отчёт..., 1981–1991 гг.). Наблюдения в этот период проводились методом регулярных наледных съёмок по системе измерительных реек, расположенных рядами на расстоянии 200 м друг от друга по ширине наледы и 100 м по её длине. Всего было установлено 272 рейки. Результаты измерений отражались на картограммах, на которых фиксировались граница ледяного массива на дату съёмки и сопутствующие явления – промоины, вода на льду, вода под снегом, бугры пучения и др. Площадь наледы определялась планиметрированием по данным наземных наблюдений, объём – расчётом через площади сечения ледяного покрова по всем поперечным профилям.

С 1962 по 1967 г. наледные съёмки проводились ежедекадно, с ноября 1967 по сентябрь 1970 г. – ежемесячно, а в 1971–1978 гг. – только в период стаивания, начиная с даты начала снеготаяния. В 1978–1990 гг. измерения сократились до двух раз в год: в период максимального (в конце апреля – начале мая) и минимального (в конце сентября) развития наледы. В данных наблюдений присутствуют пропуски, а также материалы пониженной точности, которые при анализе не учитывались.

В современный период площадь наледы в тёплый сезон года определялась по космическим снимкам Landsat 2000–2017 гг. и Sentinel периода 2018–2021 гг. При обработке космических снимков применялся автоматический метод выделения границ ледяного поля, описанный в работе (Макарьева и др., 2019), с ручным контролем полученных результатов. Расчёт морфометрических

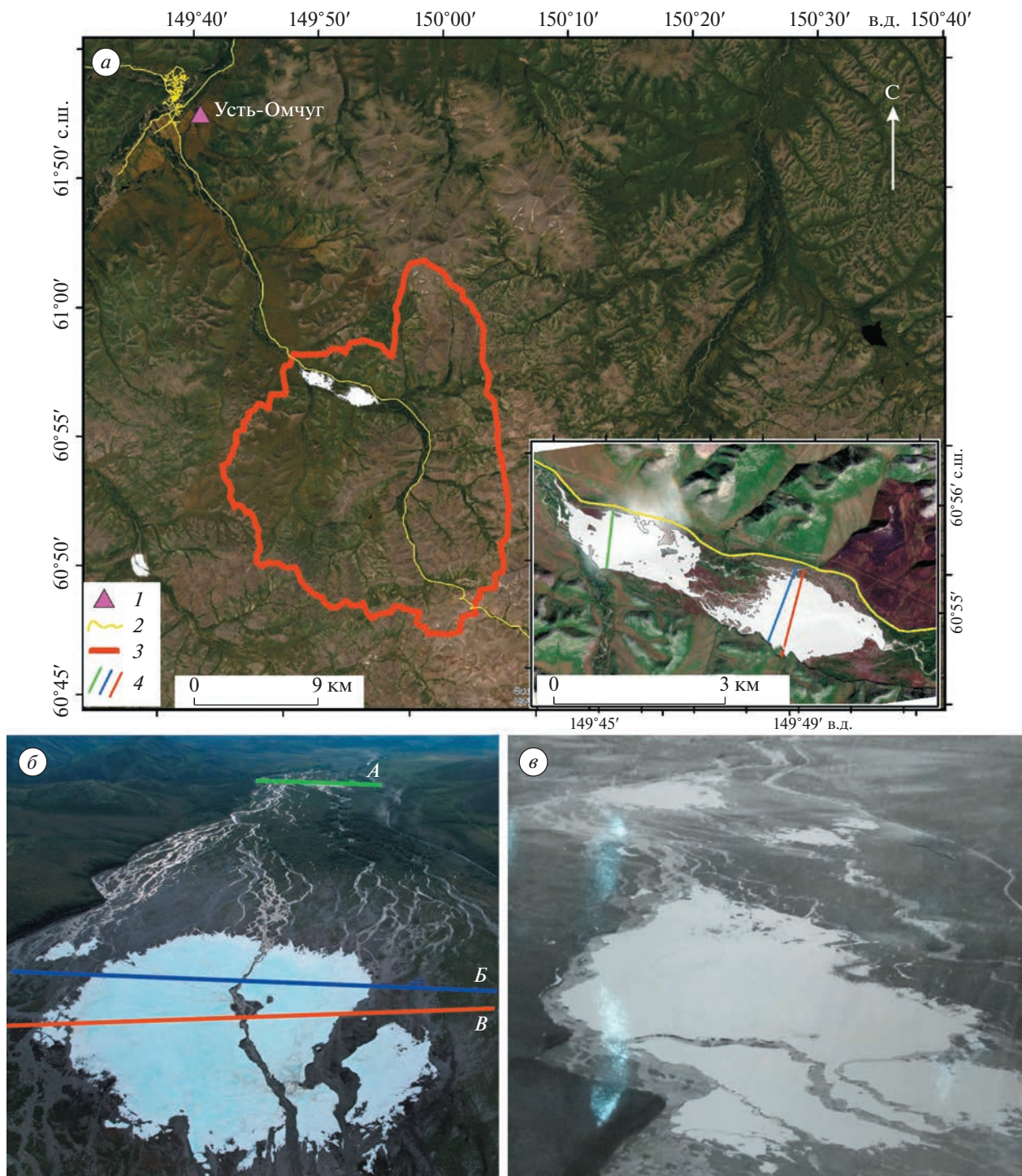
характеристик наледы выполнен лишь по снимкам, полученным в тёплый период года, когда снежный покров на окружающей территории полностью растаял. Наличие облачности затрудняет дешифрирование, поэтому в 2000–2017 гг. количество снимков Landsat, выбранных для анализа, изменялось от 1 в 2005/06 г. и до 10 в 2012 г. Из комплекта снимков Sentinel за 2018–2021 гг. применялись от 10 в 2021 г. и до 15 в 2019 г. источников информации. В общей сложности проанализировано 83 снимка Landsat и 52 – Sentinel. Для анализа динамики максимальной площади наледы выбирались снимки, полученные в даты, близкие к переходу среднесуточной температуры воздуха по метеорологической станции Усть-Омчуг (30 км от Анмангындинской наледы) через 0°C в сторону положительных значений.

Для определения динамики толщины льда проводились наземные круглогодичные измерения толщины льда по трём характерным профилям длиной 680, 1510 и 1570 м (рис. 1, а, в) с помощью нивелира. Вертикальная точность измерений в дискретных точках составляет 1.9 мм. Расстояние между наблюдательными точками измерений в пределах каждого профиля, составляет от 10 до 70 м, общее количество точек на трёх профилях – 140. С сентября 2020 г. по май 2021 г. выполнено 17 съёмок с помощью нивелира.

С 14 мая 2021 г. для определения высот поверхности наледы стала применяться RTK-съёмка на базе GNSS (Global Navigation Satellite System). GNSS оборудование представляет собой два приёмника, один из которых работает в режиме базовой станции, а другой – в режиме ровера (Real Time Kinematic). В каждой точке профиля выполняются измерения плановых и высотных координат, точность абсолютных вертикальных отметок составляет до 5 см.

Проведено сравнение данных, полученных двумя методами одновременно (нивелировка и RTK-съёмка), результат оказался удовлетворительным – разница между значениями составила от 0 до 3.8 см, в среднем 1.7 см. Поэтому все последующие наблюдения за толщиной наледы проводились менее трудозатратным методом – RTK-съёмкой. Всего проведено 15 съёмок.

Для оперативного определения морфометрических характеристик наледы (в тёплый период года) и наледных явлений (круглогодично) применялись данные съёмки БПЛА. В период с июля 2020 г. по февраль 2022 г. съёмка проводилась ежемесячно в стадию формирования тарына и более двух раз в месяц – в стадию его разрушения, всего выполнено 18 съёмок. С 25 мая 2021 г. на БПЛА установлена GNSS антенна, которая позволила по девяти съёмкам оценить не только площадь, но и объём ледяного массива. Методика обработки материалов БПЛА основана на фотограм-



**Рис. 1.** Анмангындинский наледный полигон: *a* – схема объекта исследования: 1 – метеорологическая станция Усть-Омчуг, 2 – Тенькинская трасса, 3 – граница бассейна р. Анмангында (площадь 376 км<sup>2</sup>), 4 – профили для наблюдений за толщиной наледи; *b* – снимок наледи с БПЛА от 12.07.2021 (площадь льда на дату съёмки 0.45 км<sup>2</sup>), на фото показаны профили для наблюдений за толщиной наледи (см. рис. 3); *c* – снимок наледи с высоты 1400 м от 15.07.1963 (площадь льда на дату съёмки ≈ 1.40 км<sup>2</sup>) (Научно-технический отчёт..., 1967).

**Fig. 1.** The scheme of the Anmangynda aufeis: *a* – the scheme of research object: 1 – Ust-Omchug meteorological station, 2 – Tenkinskiy highway, 3 – the boundary of the catchment area of the Anmangynda river is 376 km<sup>2</sup>, 4 – the profiles for observing the ice depth; *b* – a photo of the Anmangynda aufeis from an unmanned aerial vehicle from 12.07.2021 (the aufeis area at the date of the survey is 0.45 km<sup>2</sup>), the photo shows the profiles for observing the ice depth (see fig. 3); *c* – a photo of the Anmangynda aufeis from a height of 1400 m from 15.07.1963 (the aufeis area at the date of the survey is ≈ 1.40 km<sup>2</sup>) (Nauchno-tehnicheskii..., 1967).

метрическом анализе, сопоставлении данных GNSS приемника и антенны беспилотника, а также уточнении координат центров снимков по наземным опознавательным знакам. Обработанные данные БПЛА сравнивались с данными наземных круглогодичных измерений мощности льда по 140 точкам трёх характерных нивелирных профилей. В дискретных точках разница высотных отметок льда варьировалась от  $-1.4$  до  $+0.2$  м, а в среднем составила  $+0.16$  м (данные БПЛА превышают значения наземных наблюдений).

Максимальный объём наледи за современный период рассчитан на основе эмпирической зависимости:

$$W = aS^n, \quad (1)$$

где  $W$  – объём льда (тыс. м<sup>3</sup>);  $S$  – площадь льда, тыс. м<sup>2</sup>;  $a$ ,  $n$  – коэффициенты. Значения  $a$  и  $n$  существенно меняются в зависимости от генетического типа наледи (источника наледообразования), рельефа местности (подстилающего ложа), величины твёрдых осадков (снежного покрова), температуры воздуха и некоторых других факторов, так как они отражают непосредственно сведения о толщине льда (Соколов, 1975; Толстихин, 1975; Соколов, Саркисян, 1981).

Объём Анмангындинской наледи рассчитывался по формуле (1), при этом учитывались эмпирические коэффициенты: 1)  $a = 0.364$  и  $n = 1.167$ , рассчитанные на основе анализа данных по результатам натурных измерений объёмов и площади Анмангындинского тарына за 1963–1990 гг. (рис. 2; кривая 2); 2)  $a = 0.96$ ,  $n = 1.094$ , полученные (Соколов, 1975) на 310 объектах криолитозоны России (см. рис. 2, кривая 3); 3)  $a = 0.75$ ,  $n = 1.12$ , полученные (Соколов, Саркисян, 1981) по данным 1200 наледей, расположенных в разных условиях, в том числе в Канаде и Монголии (см. рис. 2, кривая 4). Средняя квадратичная ошибка составляет 34.7% для отдельно взятой наледи (Соколов, Саркисян, 1981); 4)  $a = 0.511$ ,  $n = 1.146$ , рассчитанные (Толстихин, 1975) по данным полевых наблюдений на пяти наледях, в том числе Анмангындинской наледи (см. рис. 2, кривая 5).

Анализ результатов расчёта за исторический период (1963–1990 гг.) показал, что параметры  $a$  и  $n$ , представленные в работах (Толстихин, 1974; Соколов, 1975; Соколов, Саркисян, 1981), существенно завышают фактические значения объёма Анмангындинской наледи (см. рис. 2). В то же время среднее абсолютное отклонение рассчитанных по формуле (1) значений от наблюдаемых с использованием коэффициентов ( $a = 0.364$  и  $n = 1.167$ ), полученных на основе данных натурных наблюдений 1963–1990 гг., в среднем составила 10%.

За период 2000–2021 гг. величина средней толщины ледяного массива на дату максимального развития тарына рассчитана как частное от объёма наледи, полученного по формуле (1), к площади наледи по спутниковым и БПЛА снимкам. Сезонная динамика изменения толщины льда за период 2020–2021 гг. оценивалась на основе анализа величины  $K$  на трёх профилях:

$$K = \frac{H_2 - H_1}{T}, \quad (2)$$

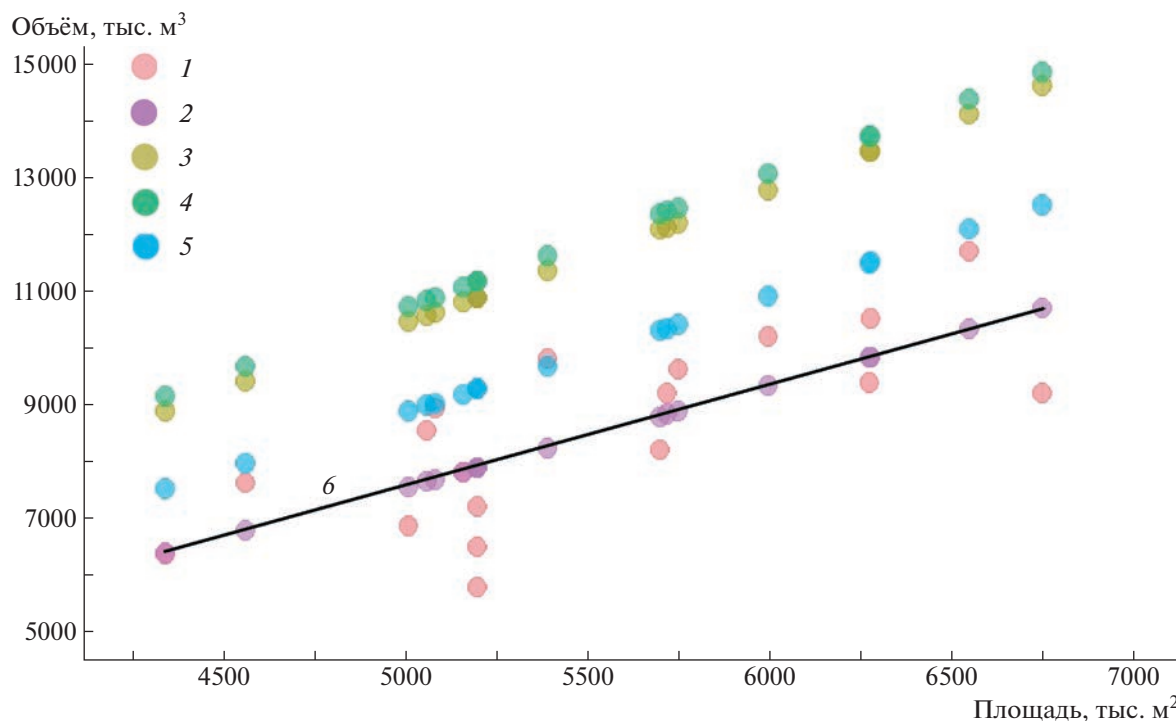
где  $H_2$  – среднее арифметическое толщины льда на всех точках профиля, м;  $H_1$  – средняя толщина льда на дату предыдущего измерения, м;  $T$  – интервал времени между измерениями (сут),  $K$  – скорость изменения толщины льда (м/сут). Также анализировалось абсолютное значение максимальной толщины льда на каждом профиле.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалы, полученные методами наземных и дистанционных съёмки в современный период в совокупности с данными анализа исторических материалов, позволили выявить ряд характерных особенностей развития Анмангындинской наледи в сезонных и многолетних циклах развития.

**Динамика наледи в стадию нарастания.** В 2020 г. формирование наледи началось в начале октября с наступлением устойчивых морозов, когда средняя суточная температура воздуха перешла через 0°C (2.10.2020). Обычно вначале лёд образуется на поверхности русловых отложений в пределах осушенных каналов стока, а также вдоль берегов и на льду промерзающих мелководных потоков. Затем лёд постепенно распространяется на всю пойму, занимая пространство от борта до борта долины. В периоды потепления рост льда прекращается или значительная часть его стает при воздействии солнечной радиации и термомеханического воздействия речных вод. В первые месяцы зимы площадь наледи растёт значительно быстрее, чем её объём, так как вышедшая на поверхность вода свободно растекается по поверхности наледной поляны, долго не замерзая. С усилением морозов длина пути наледообразующих вод до места её полной кристаллизации сокращается, в результате чего вода намерзает преимущественно вблизи очагов разгрузки, что приводит к неоднородности распределения мощности ледяного массива.

Обычно на ледяном поле к весне формируется несколько таких аномальных зон, часть из которых год от года смещается без определённой закономерности. В конце декабря наледь занимает примерно 50%, а её объём – лишь 10–15% от максимальных в году значений. В январе скорости нарастания площади и объёма выравниваются, а с февраля увеличение объёма преобладает над



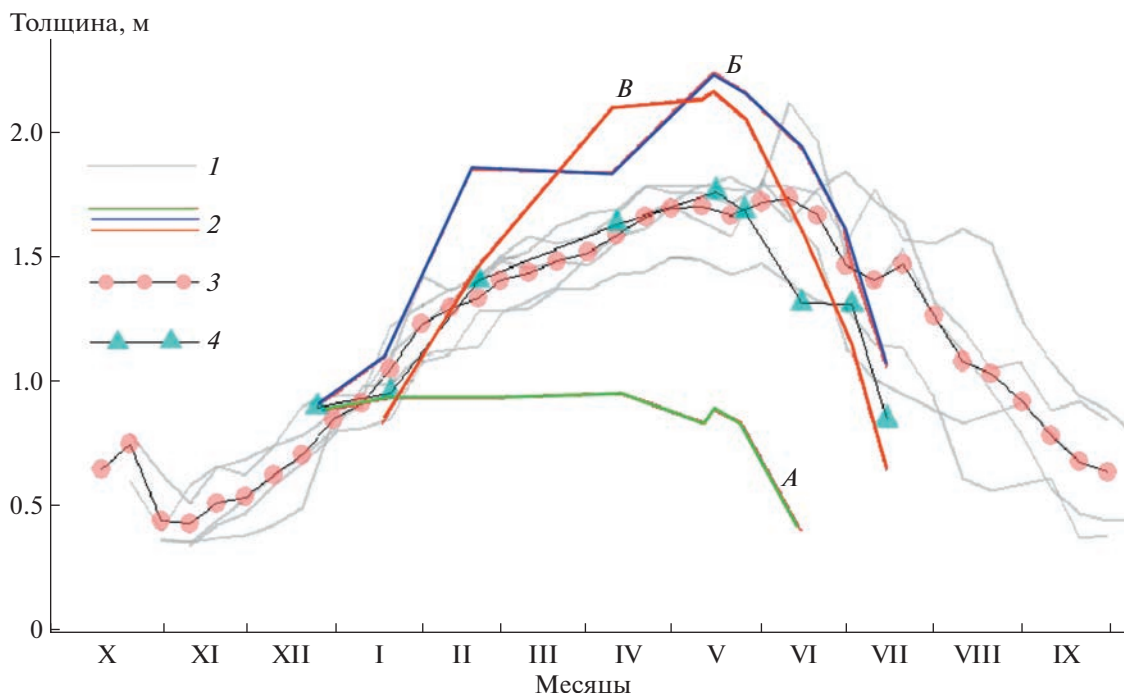
**Рис. 2.** Связь максимальных объёмов и площадей Анмангындинской наледи за период 1963–1990 гг. по наблюдаемым и расчётным данным из разных источников: 1 – по материалам Колымского управления гидрометеорологической службы (КУГМС), собранных за период 1963–1990 гг.; расчёт объёма Анмангындинской наледи по формуле  $W = aS^n$ , где  $W$  – объём льда (тыс.  $m^3$ ),  $S$  – площадь льда, тыс.  $m^2$  (наблюдаемые данные КУГМС в 1963–1990 гг.),  $a, n$  – коэффициенты, отражающие особенности природных условий, получены разными исследователями на основе различных источников информации; 2 – на основе связи объёма и площади наледи, полученной по данным КУГМС 1963–1990 гг.:  $a = 0.364$  и  $n = 1.167$ ; 3 – на основе связи объёма и площади 310 наледей, исследованных в 1934–1975 гг. (Б.Л. Соколов, 1975):  $a = 0.96$ ,  $n = 1.094$ ; 4 – на основе связи объёма и площади 1200 наледей, исследованных в 1934–1980 гг. (Б.Л. Соколов и В.О. Саркисян, 1981):  $a = 0.75$ ,  $n = 1.12$ ; 5 – на основе связи объёма и площади пяти тарынов, исследованных в 1961–1974 гг. (О.Н. Толстихин, 1974):  $a = 0.511$ ,  $n = 1.146$ ; 6 – связь площади и объёма наледи по данным КУГМС 1963–1990 гг., выраженная линейным трендом.

**Fig. 2.** The relation between the maximum volume and area of the Anmangynda aufeis for the period 1963–1990 according to the observed and calculated data from various sources: 1 – observed data (1963–1990) of the Kolyma Department of the Hydrometeorological Service; the Anmangynda aufeis volume was calculated by formula  $W = aS^n$ , where  $W$  is the volume of ice (thousand  $m^3$ ),  $S$  is the area of ice, thousand  $m^2$  (observed data, 1963–1990),  $a, n$  are the coefficients reflecting the features of natural conditions were obtained by different authors on the basis of various sources of information; 2 – the relationship between the volume and area of aufeis obtained in 1963–1990, so  $a = 0.364$  and  $n = 1.167$ ; 3 – Sokolov (1975) proposed  $a = 0.96$ ,  $n = 1.094$  (analysis of information about 310 aufeis for 1934–1975); 4 – Sokolov and Sarkisyan (1981) proposed  $a = 0.75$ ,  $n = 1.12$  (analysis of information about 1200 aufeis studied in 1934–1980); 5 – O.N. Tolstikhin (1974) proposed  $a = 0.511$ ,  $n = 1.146$  (analysis of information about five aufeis for 1961–1974); 6 – the relationship between the area and the volume of aufeis according to the monitoring data 1963–1990, expressed by a linear trend.

увеличением площади. Перед началом снеготаяния прирост объёма и средней мощности льда стабилизируется, в отдельные годы даже прекращается, но затем вновь увеличивается за счёт намораживания атмосферных осадков и талых снеговых вод. Максимальных размеров наледь достигает в период с 24 апреля по 22 мая (в среднем 4 мая).

Режим наледообразования существенно меняется с течением времени (рис. 3). В качестве примера приведём сведения по некоторым годам исторического и современного периодов. В 1962–1967 гг. до середины октября наблюдалось то образование, то разрушение льда. Так, 10 октября

средняя толщина наледи составляла 0.68 м, на 20 октября – 0.85 м; в конце октября за счёт неравномерного увеличения площади и объёма толщина льда стала значительно меньше – 0.47 м. В ноябре происходило очень медленное увеличение мощности ледяного покрова – в среднем до 0.50 м. В декабре–феврале наблюдался активный прирост льда с максимумом в январе. Средняя толщина наледи в эти месяцы составила 0.73, 1.10 и 1.37 м соответственно. В марте процесс наледообразования замедлился, в апреле возник второй пик прироста льда. Средняя толщина льда в марте, апреле и мае составила 1.50, 1.69 и 1.79 м.



**Рис. 3.** Внутригодовая динамика средней толщины Анмангындинской наледи. 1 – данные наблюдений 1963–1967 гг.; 2 – средняя толщина льда по характерным профилям (см. рис. 1, б), измеренная в 2020/21 г.; 3 – средняя толщина льда осредненная по 140 наблюдаемым точкам за 2020/21 г.; 4 – средняя толщина льда осредненная за исторический период 1963–1967 гг.

**Fig. 3.** Intra-annual dynamics of the average ice depth of the Anmangynda aufeis. 1 – observed data 1963–1967; 2 – average ice thickness according to characteristic profiles (see fig. 1, б), measured in 2020/21; 3 – average ice depth averaged over 140 observed points for 2020/21; 4 – average ice depth averaged over the historical period 1963–1967.

В октябре 2020 г. формирование наледи протекало медленно, в конце декабря средняя толщина льда достигла 0.89 м с максимальной величиной 2.04 м. В середине января 2021 г. среднее значение толщины льда составило 0.96 м при максимуме 2.57 м. В феврале наблюдался активный прирост льда в верхней части наледной поляны, сопровождающийся образованием бугров пучения; в нижней части ледяной массив остался практически без изменений. Средняя толщина наледи за этот месяц составила 1.41 м, а максимум достиг 3.76 м. В марте наледь находилась в относительном покое. В начале апреля активизировался выход подземных вод на поверхность льда; в одном из бугров пучения скорость изливающегося потока воды составила 0.3 м/с. Средняя толщина льда в этом месяце достигла 1.63 м при максимуме 4.09 м. После перехода средней суточной температуры воздуха через 0°C в конце апреля началось таяние льда, однако несмотря на это в ночное время на некоторых участках продолжалось нарастание мощности ледяного массива. В результате 14 мая средняя толщина льда составила 1.76 м, а максимум достиг 4.44 м. Уменьшение мощности ледяного покрова по всем профилям было зафиксировано по наблюдениям 25 мая.

**Динамика наледи в стадию разрушения.** До 1990 г. Анмангындинская наледь была перелетовывающей – до 10% её площади (в среднем 1–4%) не успевала разрушиться и включалась в новый цикл наледообразования. Например, 30 августа 1965 г. площадь наледи составляла 0.68 км<sup>2</sup>, 15 сентября 1968 г. – 0.3 км<sup>2</sup>. Период существования наледи со дня начала таяния до полного исчезновения составлял в среднем 144 дня. В XX веке наледная поляна, согласно данным, полученным по космическим снимкам, полностью освобождалась ото льда в конце августа–начале сентября. Период разрушения ледяного массива сократился в среднем на 34 дня. Это связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, в 1963–1970 гг. средняя максимальная площадь наледи составляла 5.9 км<sup>2</sup>, а в 2000–2021 гг. – 4.7 км<sup>2</sup> (на 20% меньше). Во-вторых, за последние 50 лет температура воздуха в мае–августе повысилась на 1.3, 0.6, 1.2 и 0.8°C соответственно (м/с Усть-Омчуг, 1967–2021 гг.). При этом дата перехода температуры воздуха через ноль градусов в сторону положительных значений практически не изменилась, хотя диапазон её смещения достигал 30 дней – от 24 апреля в 1986 г. до 22 мая в 1987 г. В среднем дата начала таяния ледяного покрова приходится на 5 мая.

**Таблица 1.** Характеристики Амангындинской наледи на даты её максимального развития в период 1963–2021 гг.

| Дата максимального развития наледи* | Площадь, км <sup>2</sup> | Объём, млн м <sup>3</sup> | Средняя толщина льда, м | Дата самого раннего весеннего снимка** | Площадь, км <sup>2</sup> | Объём, млн м <sup>3</sup> | Средняя толщина льда, м |
|-------------------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|--|--------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 29.04.1963                          | 5.99                     | 10.19                     | 1.70                    | 07.05.2000                             | 5.40                     | 8.24                      | 1.53                    |
| 30.04.1964                          | 6.27                     | 9.39                      | 1.50                    | 13.05.2002                             | 5.23                     | 7.95                      | 1.52                    |
| 20.05.1965                          | 5.39                     | 9.81                      | 1.82                    | 25.05.2003                             | 5.24                     | 7.96                      | 1.52                    |
| 10.05.1966                          | 5.08                     | 8.95                      | 1.75                    | 29.05.2008                             | 4.24                     | 6.23                      | 1.47                    |
| 10.05.1967                          | 6.55                     | 11.70                     | 1.79                    | 25.05.2009                             | 4.32                     | 6.36                      | 1.47                    |
| 30.04.1968                          | 5.75                     | 9.61                      | 1.67                    | 26.04.2010                             | 5.34                     | 8.14                      | 1.53                    |
| 16.05.1970                          | 6.28                     | 10.50                     | 1.67                    | 08.05.2012                             | 5.22                     | 7.92                      | 1.52                    |
| 06.05.1977                          | 5.72                     | 9.20                      | 1.61                    | 12.05.2013                             | 5.02                     | 7.59                      | 1.51                    |
| 08.05.1978                          | 6.75                     | 9.20                      | 1.36                    | 15.05.2014                             | 4.92                     | 7.40                      | 1.50                    |
| 11.05.1979                          | 5.16                     | 7.80                      | 1.51                    | 18.05.2015                             | 4.88                     | 7.34                      | 1.50                    |
| 25.04.1981                          | 5.05                     | 8.54                      | 1.69                    | 16.05.2016                             | 5.00                     | 7.54                      | 1.51                    |
| 25.04.1982                          | 4.56                     | 7.62                      | 1.67                    | 01.05.2017                             | 3.54                     | 5.05                      | 1.42                    |
| 27.04.1983                          | 5.20                     | 7.20                      | 1.38                    | 08.05.2018                             | 3.97                     | 5.76                      | 1.45                    |
| 24.04.1984                          | 5.70                     | 8.20                      | 1.44                    | 11.05.2019                             | 4.35                     | 6.42                      | 1.47                    |
| 26.04.1985                          | 5.20                     | 6.50                      | 1.25                    | 15.05.2020                             | 3.87                     | 5.59                      | 1.45                    |
| 30.05.1986                          | 5.20                     | 5.80                      | 1.12                    | 07.05.2021                             | 4.86                     | 7.30                      | 1.50                    |
| 28.04.1987                          | 5.01                     | 6.86                      | 1.37                    | 24.05.2021                             | 3.64***                  | 5.21                      | 1.43                    |
| 24.05.1990                          | 4.34                     | 6.38                      | 1.47                    |  |                          | 4.85***                   | 1.33***                 |

\*Даты с наибольшей площадью наледи за год наблюдений. \*\* Даты с наибольшей площадью наледи в тёплый период после схода снежного покрова, она приближена к максимальному значению за год. \*\*\*Данные съёмки Анмангындинской наледи с БПЛА.

В первые 15 дней от начала таяния потери льда составляли примерно 10% от максимальной площади. Интенсивное разрушение льда происходило в основном по периферии тарына, где радиационное воздействие усиливается адвективными потоками воздуха с прилегающих склонов. В конце мая—начале июня площадь и объём наледи резко сократились под влиянием талых наледных вод и вод речного половодья, которые прорезали ледяной массив в разных местах, эродировали его с боков и снизу и расчленили на крупные блоки. В это время разрушается от 30 до 50% объёма льда. В июле—августе, несмотря на более высокую среднюю месячную температуру воздуха, процесс абляции замедляется в связи с тем, что блоки льда осушаются и их термомеханическое разрушение уже не происходит.

Сложность изучения и формализации динамики морфометрических характеристик Анмангындинской наледи в тёплый период года определяется, с одной стороны, влиянием метеорологических факторов, а с другой — непредсказуемым термоэрозийным воздействием мигрирующих потоков подземных, талых наледных и речных вод половодья и паводков. На рис. 4 показано изменение площади тарына в процессе его разрушения за годы натурных наблюдений. Видно, что диапазон величин на определенную дату от начала таяния очень широк. При этом средние их зна-

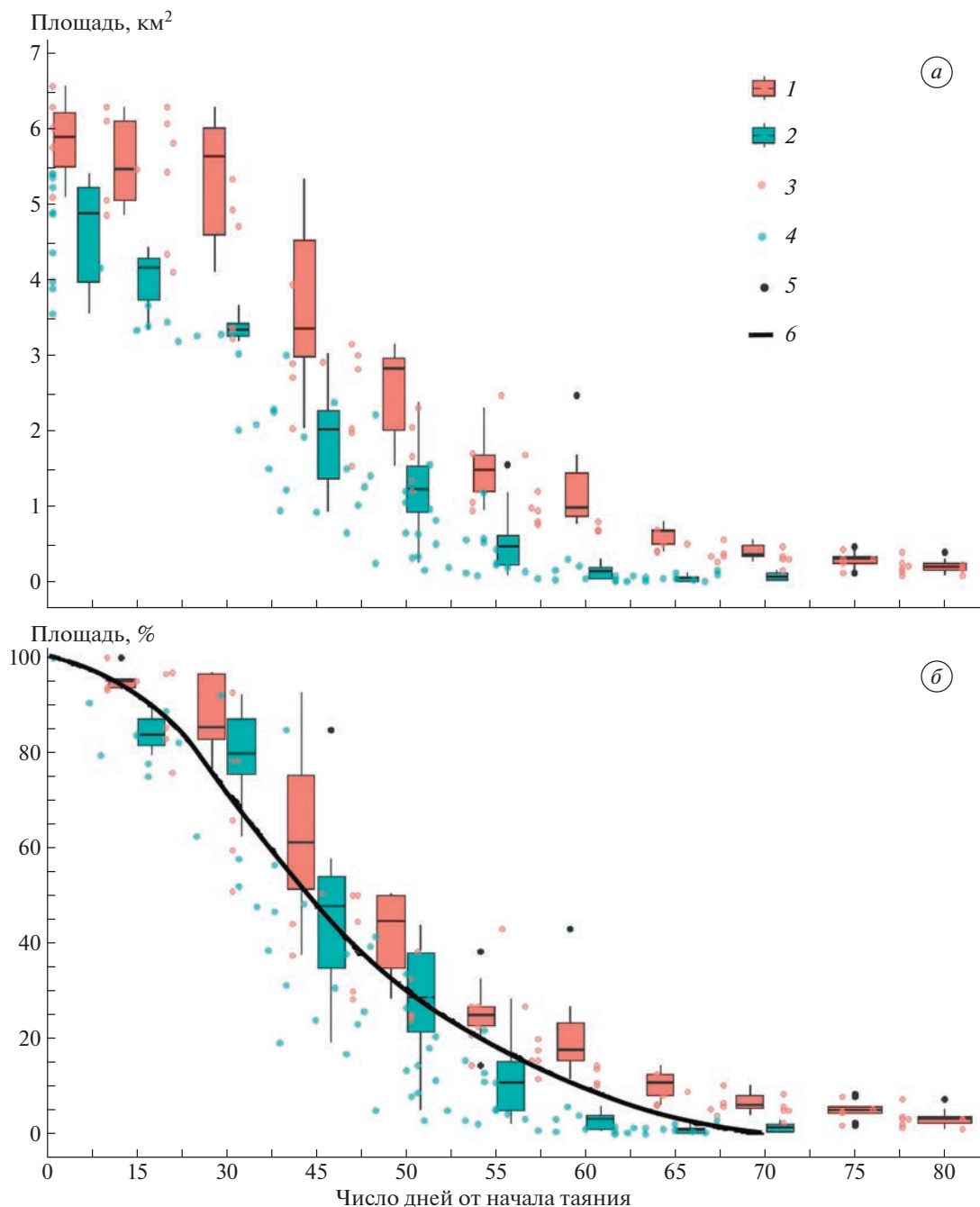
чения близки к кривой распределения, полученной Б.Л. Соколовым при обобщении материалов измерений по всем наледным регионам России и Северной Америки.

**Многолетняя изменчивость максимальных размеров наледи.** В 1963–1990 гг. максимальная площадь Анмангындинской наледи изменялась от 4.3 до 6.8 км<sup>2</sup>, средняя величина составила 5.5 км<sup>2</sup>, коэффициент вариации — 0.11. Максимальный объём ледяного массива изменялся от 5.3 до 11.7 млн м<sup>3</sup>, средняя величина составила 8.5 млн м<sup>3</sup>, а коэффициент вариации — 0.18. Средняя толщина наледи варьировала от 1.29 до 2.28 м. Максимальная толщина льда в отдельные годы достигала 8 м (Алексеев, 2016), в 2021 г. она составила 5.9 м. В 2000–2021 гг. максимальная площадь Анмангындинской наледи колебалась в пределах 3.5–5.4 км<sup>2</sup>, средняя величина составила 4.7 км<sup>2</sup>, коэффициент вариации 0.12, объём 5.0–8.2 млн м<sup>3</sup> (среднее 7.1 млн м<sup>3</sup>, коэффициент вариации 0.13).

Анализ изменения морфометрических характеристик наледи за весь 60-летний период показал их значительное сокращение (табл. 1, рис. 5). Максимальная площадь уменьшилась на 25%, а максимальный объём — на 33%.

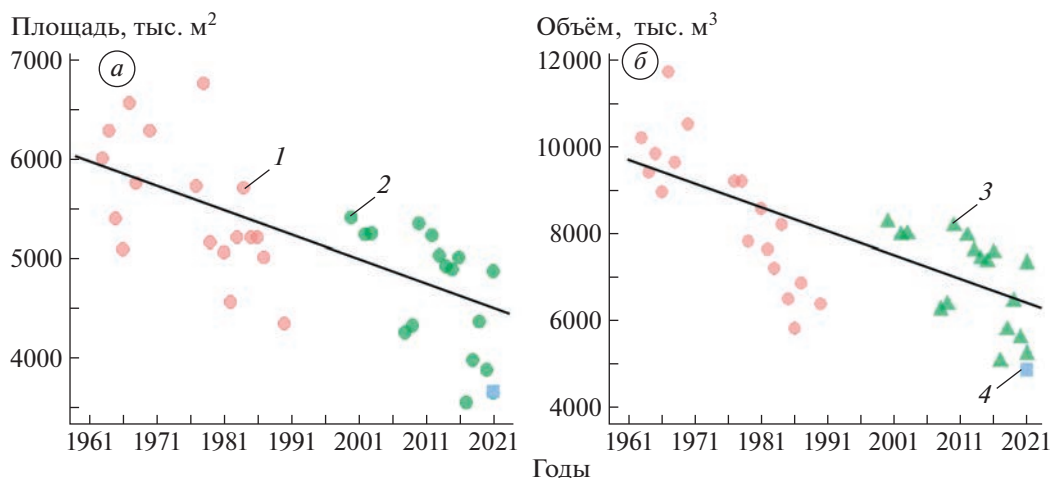
За период 1963–1990 гг. средняя толщина льда на дату максимального развития наледи изменялась от 1.12 до 1.82 м, в среднем составила 1.54 м,





**Рис. 4.** Динамика площади Анмангындинской наледи в тёплый период года, выраженная в абсолютных (а) и относительных (б) значениях: 1 – исторические данные (1963–1968 гг.), сгруппированные по 15 суток; 2 – современные данные (2000–2021 гг.), сгруппированные по 15 суток; 3 – данные полевых наблюдений за 1963–1968 гг.; 4 – данные по современным спутниковым снимкам (2000–2021 гг.). “Ящик с усами” (1, 2) представляет собой сведения о размерах наледи в течении 15 суток. Нижний и верхний края “ящика с усами” – первый и третий квартили соответственно; центральная линия – медиана; “усы” соответствуют минимальному и максимальному значениям, не более полутора межквартильных размахов; 5 – выбросы (измерения, выходящие за данный интервал); 6 – кривая сокращения относительной площади для наледей размерами 0.6–23.0  $\text{km}^2$  до начала таяния (Соколов, 1975).

**Fig. 4.** Boxplot of the Anmangyndin auefis area magnitude in warm season expressed in absolute ( $\text{km}^2$ ) (a) and relative (%) (b) values: 1 – historical data (1963–1968) grouped by 15 days; 2 – recent satellite imagery data (2000–2021) grouped by 15 days; 3 – historical data (1963–1968); 4 – recent satellite imagery data (2000–2021). The “boxplot” (1, 2) presents the information about the auefis area grouped by 15 days. Lower and upper edges of the “boxplot” – the first and third quartiles, respectively; the central line – the median; “whiskers” correspond to the minimum and maximum values, but not more than 1.5 interquartile range; 5 – outliers (measurements beyond this interval); 6 – relative area reduction curve for auefis with a size of 0.6–23.0  $\text{km}^2$  (Sokolov, 1975).



**Рис. 5.** Многолетняя динамика максимальной площади (а) и объёма (б) Анмангындинской наледи за период 1963–2021 гг., на основе данных из разных источников: 1 – исторические данные 1963–1991 гг.; 2 – данные по спутниковым снимкам за период 2000–2021 гг.; 3 – данные съёмки с БПЛА, 2021 г.; 4 – данные объёма, рассчитанные по формуле 1.

**Fig. 5.** Long-term dynamics of the maximum area (a) and volume (б) of the Anmangynda aufeis for the period 1963–2021, based on data from different sources: 1 – observed data 1963–1991; 2 – satellite imagery data for 2000–2021; 3 – data of an unmanned aerial vehicle, 2021; 4 – data of volume calculated according to formula 1.

коэффициент вариации 0.12. Максимальная толщина льда к началу периода абляции составляла от 4.0 до 5.2 м, в среднем 4.6 м. В некоторые годы (1967–1968 гг.) происходило асинхронное сокращение площади и объёма наледи, в таком случае средняя толщина льда в некоторые периоды абляции увеличивается. Например, к 10 июня 1967 г. максимальная площадь льда с 30 апреля 1967 г. сократилась уже в 2 раза (с 6.55 до 3.34 км<sup>2</sup>), а объём уменьшился только на 40% (с 11.7 до 7.09 млн м<sup>3</sup>), за счёт этого средняя толщина наледи составила 2.12 м, превысив среднюю толщину на дату максимального развития (1.79 м) на 0.33 м.

В 2000–2021 гг. значения толщины льда колебались от 1.42 до 1.55 м при среднем значении 1.49 м (коэффициент вариации 0.05).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Многолетняя динамика морфометрических характеристик Анмангындинской наледи и их связь с температурой воздуха и атмосферными осадками за осенний период 1963–1990 гг. ранее рассмотрена в работах (Алексеев и др., 2012, Бояринцев, 2015, Алексеев, 2016). Наибольшая вариация размеров наледи (до 30%) наблюдалась с 1962 по 1976 г., позднее составляла 10–15%. За 30 лет средняя месячная температура воздуха и сумма осадков в октябре и ноябре повысилась на 3.8°C и 40 мм соответственно, что вызвало уменьшение глубины сезонного промерзания аллювиальных отложений и, как следствие, увеличение транзитного стока подземных вод, которые ранее расходовались на образование наледи. Вследствие это-

го объём льда за указанный период сократился вдвое. Наши исследования в 2000–2021 гг. подтвердили общую тенденцию уменьшения объёмов наледи, причем их отклонения от максимума 1967 г. достигли 40% (в периоды до 1970 г. они составляли 16%, а до 1990 г. – 35%). Средняя многолетняя сумма осадков за 1992–2021 гг. по сравнению с предыдущим периодом увеличилась на 52 мм (основной вклад внесли значения за август), но количество осадков за октябрь и ноябрь изменилось незначительно – уменьшилось на 0.7 и увеличилось на 5.8 мм, при этом средняя месячная температура воздуха увеличилась на 1.3 и 2.9°C соответственно (м/с Усть-Омчуг, 1967–2021 гг.).

Выявленный тренд сокращения объёма Анмангындинского тарына в целом согласуется с данными по динамике других гигантских наледей Северо-Востока России (Атлас..., 2021). Так, на водосборе р. Улахан-Саккырыр (бассейн р. Яна) площадь наледей в современный период, определенная по космическим снимкам, оказалась почти в 3 раза меньше, чем суммарная площадь наледных полей, указанная в Кадастре (Симаков, Шильниковская, 1958; Шильниковская, 1958). Такие же изменения зафиксированы в бассейнах рек Ильгувеем и Люлювеем на Чукотском полуострове. Однако есть и исключения. Например, перелетовывающая наледь Сюрюктяхская в бассейне р. Индигирка и многолетний тарын на р. Адыча в бассейне р. Яна остались в границах 1973–1974 гг. и соответствуют данным, указанным в Кадастре А.С. Симакова и З.Г. Шильниковской. Более того, некоторые ледяные массивы, например, наледи в бассейнах рек Сугун и Танюрер (системы Колымы и Анадыря) в совре-

менном климате занимают площади даже большие, чем хорошо выраженные наледные поляны.

В работе (Алексеев, 2016) освещена многолетняя динамика наледей Аляски, Южной Якутии, Забайкалья, Прибайкалья, Чукотки и Восточных Саян. Во всех указанных регионах наблюдается уменьшение размеров родниковых наледей-тарынов, хотя статистически значимая зависимость объёмов льда от температуры воздуха и количества атмосферных осадков не выражена. Аналогичные процессы наблюдаются и в Северной Америке. Например, на северо-западной части территории Канады по данным, полученным при изучении космических снимков Landsat за период с 1985 по 2014 г. наибольший пик оледенения пришелся на 2002 и 2004 гг., после чего наблюдается сокращение размеров наледей (Morse, Wolfe, 2015).

Несмотря на общую тенденцию уменьшения объёма льдов на земном шаре, влияние изменения климата на наледные процессы не однозначно и требует дальнейших исследований этого феномена.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных, полученных методами наземных и дистанционных съёмки в течение 1962–2021 гг., указал на существенные изменения в сезонных и многолетних циклах развития гигантской Анмангындинской наледы. Результаты исследования свидетельствуют, что в период 1963–1991 гг. максимальная площадь наледного массива изменялась в пределах 4.3–6.8 км<sup>2</sup> при среднем значении 5.5 км<sup>2</sup>, в 2000–2021 гг. эти величины сократились до значений 3.5–5.4 км<sup>2</sup> (среднее 4.7 км<sup>2</sup>), уменьшившись на 25%. Объём наледы составлял 5.3–11.7 млн м<sup>3</sup> (среднее 8.5 млн м<sup>3</sup>), в 2000–2021 гг. он сократился на 33% и изменялся от 5.0 до 8.2 млн м<sup>3</sup> (среднее 7.1 млн м<sup>3</sup>). Средняя толщина наледы за 1963–1991 гг. уменьшилась примерно на 40 см (23%). Существенно изменился внутригодовой режим формирования ледяного массива. Период наиболее активного прироста льда сместился с января на февраль, на 34 дня сократился период абляции. Наледь из категории многолетней перешла в разряд сезонных образований. Анмангындинский тарын отражает “ типовые ” условия формирования гигантских наледей подземных вод в криолитозоне Северо-Востока России. Учитывая транспортную доступность, многолетний ряд наблюдений продолжительностью 60 лет и перспективы хозяйственного освоения региона, Анмангындинская наледь рекомендуется в качестве научно-исследовательского стационара для постановки долгосрочных мониторинговых наблюдений.

**Благодарности.** Приобретение высокоточного оборудования для проведения измерений осу-

ществлялось при поддержке РФФИ (проекты № 20-05-00666, 19-55-80028), междисциплинарные исследования выполняются при финансовой поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (проект № 75295776, 92670123).

**Acknowledgements.** Acquisition of high-precision equipment for measurements was made available with the support of the Russian Foundation for Basic Research (projects No. 20-05-00666, 19-55-80028), interdisciplinary research is supported by St. Petersburg State University (project No. 75295776, 92670123).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.Р.* Многолетняя изменчивость родниковых наледей-тарынов // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 1. С. 73–93.
- Алексеев В.Р., Бояринцев Е.Л., Довбыш В.Н.* Многолетняя динамика размеров Амангындинской наледы в условиях изменений климата / Современные проблемы стохастической гидрологии и регулирования стока. Тр. Всерос. науч. конф., посвящая памяти выдающегося ученого-гидролога А.В. Рождественского. 10–12 апреля 2012 г. М.: Ин-т водных проблем РАН, 2012. С. 298–305.
- Алексеев В.Р., Макарьева О.М., Шихов А.Н., Нестерова Н.В., Осташов А.А., Землянкова А.А.* Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России / Отв. ред. В.В. Шепелев, М.Н. Железняк. Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова. Новосибирск: СО РАН, 2021. 302 с. ISBN 978-5-6046428-2-5
- Бояринцев Е.Л.* Влияние гидрометеорологических факторов на динамику Анмангындинской наледы // Актуальные вопросы аграрной науки. Иркутск: Иркутский гос. аграрный ун-т, 2015. № 17. С. 19–26.
- Букаев Н.А.* Основные закономерности режима гигантских наледей в верховьях р. Колымы (на примере Анмангындинской наледы) // Наледи Сибири. М.: Наука, 1969. С. 62–78.
- Гидрогеология СССР. Т. 26: Северо-Восток СССР. М.: Недра, 1972. 297 с.
- Корейша М.М.* Оледенение Верхоянско-Колымской области. М.: Междувед. геофиз. комитет при Президиуме АН СССР, 1991. 143 с.
- Кравченко В.В.* Режим наледей в верховьях р. Уды (Восточный Саян) и их роль в формировании водных ресурсов // Наледи Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск: Наука, 1981. С. 145–156.
- Лебедев В.М.* Стационарные наблюдения за наледью в бассейне р. Анмангынды // Сб. работ Магаданской ГМО. Вып. 2. Магадан, 1969. С. 122–138.
- Лебедев В.М., Ипатьева А.И.* Анмангындинская наледь, её режим и роль в водном балансе речного бассейна // Тр. Дальневост. НИГМИ. Вып. 84. Гидрологические исследования и прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1980. С. 86–93.
- Метеорологический ежемесячник. Вып. 33 / ГУГМС. Колымское управление гидрометслужбы. Магаданская гидромет. обсерватория. Магадан: 1963.

- Макарьева О.М., Шихов А.Н., Осташов А.А., Нестерова Н.В. Наледи бассейна р. Индигирка по современным снимкам Landsat и историческим данным // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. № 2. С. 201–212. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-388>
- Симаков А.С., Шильниковская З.Г. Карта наледей Северо-Востока СССР. Краткая объяснительная записка. Северо-Восточное геологическое управление Главного управления геологии и охраны недр при Совете Министров РСФСР. Магадан, 1958. 40 с.
- Соколов Б.Л. Наледи и речной сток. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 190 с.
- Сokolov B.L., Sarkisyan V.O. Подземное питание горных рек. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 239 с.
- Толстихин О.Н. Наледи и подземные воды Северо-Востока СССР // Изучение и охрана водных ресурсов. Новосибирск: Наука, 1974. 164 с.
- Шепелев В.В. Формирование и режим наледей Восточной Якутии. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. геол.-мин. наук. Л.: Ленингр. горный ин-т им. Г.В. Плеханова, 1972. 20 с.
- Шепелев В.В. Режим наледей Северо-Востока СССР // Проблемы наледеобразования. Вып. 92. 1973. С. 45–47.
- Шильниковская З.Г. Кадастр к Карте наледей Северо-Востока СССР масштаба 1 : 2 000 000 / Ред. А.С. Симаков, З.Г. Шильниковский. Магадан: Северо-Восточное территориальное геологическое управление. Центральная комплексная тематическая экспедиция, 1958. 398 с.
- Шульгин М.Ф. Типы и динамика наледей на Восточном Саяне // Проблемы регионального зимоведения. Вып. 2. Чита, 1968. С. 95–96.
- Gagarin L., Qingbai W., Melnikov A., Volgusheva N., Tananaev N., Jin H., Zhang Z., Zhizhin V. Morphometric analysis of groundwater icings: Intercomparison of estimation techniques // Remote Sensing. 2020. V. 12. № 4. P. 692. <https://doi.org/10.3390/rs12040692>
- 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. P. 1–16. doi: . 2111 <https://doi.org/10.1002/ppp>
- Makarievа 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. Perspectives of the development of complex interdisciplinary hydrological and geocryological research in the North-East of Russia // Vestnik of SPbSU. Earth Sciences. 2021. V. 66. № 1. P. 74–90. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.105>
- Morse P.D., Wolfe S.A. Geological and meteorological controls on icing (aufeis) dynamics (1985 to 2014) in subarctic Canada // Journ. of Geophys. Research: Earth Surface. 2015. № 120. P. 1670–1686. <https://doi.org/10.1002/2015JF003534>
- Terry N., Grunewald E., Briggs M., Gooseff M., Huryn A.D., Kass M.A., Tape K.D., Hendrickson P., Lane J.W. Seasonal Subsurface Thaw Dynamics of an Aufeis Feature Inferred from Geophysical Methods // Journ. of Geophys. Research: Earth Surface. 2020. V. 3125. № 3. P. e2019JF005345. <https://doi.org/10.1029/2019jf005345>
- Yoshikawa K., Hinzman L.D., Kane D.L. Spring and aufeis (icing) hydrology in Brooks Range, Alaska // Journ. of Geophys. Research. 2007. V. 112. № 1: G04S43. <https://doi.org/10.1029/2006JG000294>

---

**Citation: 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). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (1): 71–84 [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423010167**

---

## Long-Term Dynamics of the Huge Anmangynda Aufeis in the North-East of Russia (1962–2021)

A. A. Zemlianskova<sup>a,#</sup>, V. R. Alekseev<sup>b</sup>, A. N. Shikhov<sup>c</sup>, A. A. Ostashov<sup>a,b,d</sup>,  
N. V. Nesterova<sup>a,d</sup>, and O. M. Makarieva<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

<sup>b</sup> Melnikov Permafrost Institute, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

<sup>c</sup> Perm State University, Perm; Russia; <sup>d</sup> State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

<sup>d</sup> Государственный гидрологический институт, St. Petersburg, Russia

<sup>#</sup>e-mail: anastasiazemlanskova@gmail.com

The huge Anmangynda aufeis is located in the valley of the river of the same name in the Magadan region in North-East of Russia. This is the only in the world aufeis site with a 30-years period of ground-based observations (1962–1991). The materials of these observations were supplemented with data obtained from the analysis of Landsat and Sentinel satellite images for the period 2000–2021, as well as the results of field investigations carried out in 2020–2021. The long-term variability of the maximum area, volume and average thickness of ice, the dynamics of formation and destruction of the aufeis ice in the cold and

warm periods of the year were analyzed. It was found that the maximum values of the area and volume of ice on the dates before the start of ablation decreased by 25 and 33%, respectively. In 2000–2021, the average values of the aufeis characteristics are estimated as 4.7 km<sup>2</sup> and 7.1 million m<sup>3</sup>, while in 1962–1991 – 5.5 km<sup>2</sup> and 8.5 million m<sup>3</sup>. The analysis of the intra-annual dynamics revealed that the Anmangynda aufeis being earlier the perennial formation has transformed to the seasonal one. Further researches of the Anmangynda aufeis will make possible to assess the influence of various factors, including climatic ones, on the processes of an aufeis formation and to forecast their changes in the future for the cryolitic zone of the North-East of our country.

**Keywords:** huge aufeis (taryn), aufeis dynamics, seasonal glaciation, climate change, the Anmangynda aufeis

## REFERENCES

- Alekseev V.R.* Long-term variability of the spring taryn-aufeis. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2016, 56 (1): 73–92 [In Russian].
- Alekseyev V.R., Boyarintsev E.L., Dovbysh V.N.* Long-term dynamics of dimensions of the Amangynda aufeis in conditions of climate changes. *Sovremennye problemy stohasticheskoy gidrologii i regulirovaniya stoka*. Current problems of stochastic hydrology and runoff regulation. Proceedings of the All-Russia scientific conference devoted to the memory of A.V. Rozhdestvensky, outstanding hydrology researcher. Moscow: WPI RAN, 2012: 298–305 [In Russian].
- Atlas of giant aufeis-taryns of the North-East of Russia / V.R. Alekseev, O.M. Makarieva, A.N. Shikhov, N.V. Nesterova, A.A. Ostashov, A.A. Zemlyanskova; editors V.V. Shepelev, M.N. Zheleznyak; Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Melnikov Permafrost Institute. Novosibirsk: SB RAS, 2021: 302 p. ISBN 978-5-6046428-2-5 [In Russian].
- Boyarintsev E.L.* Long-term dynamics of Anmangynda icing size in the conditions of changes of climate. *Aktual'nye voprosy agrarnoy nauki*. Actual issues of agrarian science. Irkutsk: Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky. 2015, 17: 19–26 [In Russian].
- Bukaev N.A.* Main peculiarities of regime of giant aufeis in the upper part of Kolyma River (the Anmangynda aufeis as an example). *Naledi Sibiri*. Aufeis of Siberia. Moscow: Nauka, 1969: 62–78 [In Russian].
- Gidrogeologiya SSSR. Vypusk XXVI. Severo-Vostok SSSR. Hydrogeology of the USSR. Volume XXVI. North-East of the USSR. Moscow: Nedra, 1972: 297 p. [In Russian].
- Koreisha M.M.* *Oledenenie Verkhoyansko-Kolymskoj oblasti*. Glaciation of the Verkhoyansk-Kolyma region. Moscow: Interdepartmental Geophysical Committee under the Presidium of the USSR Academy of Sciences, 1991: 143 p. [In Russian].
- Kravchenko V.V.* The regime of aufeis in the upper reaches of the Uda River (Eastern Sayan) and their role in the formation of water resources. *Naledi Sibiri i Dalnego Vostoka*. Aufeis of Siberia and the Far East. Novosibirsk: Nauka, 1981: 145–156 [In Russian].
- Lebedev V.M.* Monitoring of aufeis in the Anmangynda river basin. *Magadan GMO collection of works*. Collection of works of the Magadan hydrometeorological observato-ry. Magadan: Kolyma UGMS, 1969, 2: 122–137 [In Russian].
- Lebedev V.M., Ipatieva A.I.* The Anmangynda aufeis, its regime and role in the water balance of the river basin. *Trudy DVNIGMI*. Proc. of the Far East Hydrometeorological Institute. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1980, 84: 86–93 [In Russian].
- Meteorologicheskij ezheemesyachnik. Meteorological monthly publication. Is. 33. The Main Directorate of the Hydrometeorological Service under the Council of Ministers of the USSR. Kolyma Department of hydro-meteorological service. Magadan Hydrometeorological Observatory. Magadan: 1963 [In Russian].
- Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V.* Icings of the Indigirka River basin according to the recent Landsat satellite images and historical data. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019, 59 (2): 201–212 [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-388>
- Simakov A.S., Shilnikovskaya Z.G.* *Karta naledej Severo-Vostoka SSSR. Kratkaya ob'yasnitel'naya zapiska*. Map of ice in the North-East of the USSR. Brief explanatory note. The North-Eastern Geological administration of the Main Directorate of Geology and Subsoil Resources Protection under the Council of Ministers of the RSFSR, 1958: 40 p. [In Russian].
- Sokolov B.L.* *Naledi i rechnoy stok*. Aufeis and river runoff. Leningrad: Hidrometeoizdat, 1975: 190 p. [In Russian].
- Sokolov B.L., Sarkisyan V.O.* *Podzemnoe pitanie gornyh rek*. Underground nutrition of mountain rivers. Leningrad: Hidrometeoizdat, 1981: 239 p. [In Russian].
- Tolstikhin O.N.* *Naledi i podzemnye vody Severo-Vostoka SSSR*. Aufeis and Underground Water in the North-Eastern Regions of the USSR. Novosibirsk: Nauka. USSR Academy of Sciences, 1974: 164 p. [In Russian].
- Shepelev V.V.* *Formirovanie i rezhim naledei Vostochnoi Yakutii*. Formation and regime of ice in Eastern Yakutia: Abstract. PhD –thesis. Leningrad: Plekhanov Leningrad Mining Institute, 1972: 20 p. [In Russian].
- Shepelev V.V.* The regime of aufeis in the North-East of the USSR. *Problemy naledeobrazovaniya*. Problems of aufeis formation. 1973, 92: 45–47 [In Russian].
- Shilnikovskaya Z.G.* *Kadastr k Karte naledej Severo-Vostoka SSSR masshtaba 1:2 000 000*. Cadastre to the Map of the ice of the North-East of the USSR scale 1:2 000 000 / Ed. A. S. Simakov, Z. G. Shilnikovskaya.

- Magadan: North-Eastern Territorial Geological Department. Central complex thematic expedition, 1958: 398 p. [In Russian].
- Shulgin M.F.* Types and dynamics of ice on the Eastern Sayan. *Problemy regional'nogo zimovedeniya*. Problems of regional winter science. Chita, 1968, 2: 95–96 [In Russian].
- Gagarin L., Qingbai W., Melnikov A., Volgusheva N., Tannanaev N., Jin H., Zhang Z., Zhizhin V.* Morphometric analysis of groundwater icings: Intercomparison of estimation techniques. *Remote Sensing*. 2020, 12 (4): 692. <https://doi.org/10.3390/rs12040692>
- 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 Process*. 2021: 1–16. <https://doi.org/10.1002/ppp.2111>
- 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.* Perspectives of the development of complex interdisciplinary hydrological and geocryological research in the North-East of Russia. *Vestnik of SPbSU. Earth Sciences*. 2021, 66 (1): 74–90. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.105>
- Morse P.D., Wolfe S.A.* Geological and meteorological controls on icing (aufeis) dynamics (1985 to 2014) in subarctic Canada. *Journ. of Geophys. Research. Earth Surface*. 2015, 120: 1670–1686. <https://doi.org/10.1002/2015JF003534>
- Terry N., Grunewald E., Briggs M., Gooseff M., Huryn A.D., Kass M.A., Tape K.D., Hendrickson P., Lane J.W.* Seasonal Subsurface Thaw Dynamics of an Aufeis Feature Inferred from Geophysical Methods. *Journ. of Geophys. Research: Earth Surface*. 2020., 3125 (3): e2019JF005345. <https://doi.org/10.1029/2019jf005345>
- Yoshikawa K., Hinzman L.D., Kane D.L.* Spring and aufeis (icing) hydrology in Brooks Range, Alaska. *Journ. of Geophys. Research*. 2007, 112 (1: G04S43). <https://doi.org/10.1029/2006JG000294>