

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П., Токарев И.В., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Паламарчук В.А., Блудушкина Л.Б., Слышкина Е.С. Морфология наледи Булуус, Улахан-Тарын, условия ее залегания и распределение стабильных изотопов кислорода и водорода в нижней части // Арктика и Антарктика. 2024. № 1. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.1.70079 EDN: ICABMG URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=70079](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=70079)

## Морфология наледи Булуус, Улахан-Тарын, условия ее залегания и распределение стабильных изотопов кислорода и водорода в нижней части

**Васильчук Юрий Кириллович**

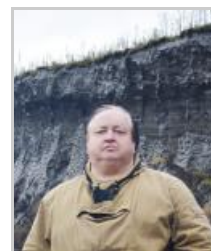
ORCID: 0000-0001-5847-5568

доктор геолого-минералогических наук

профессор, Московский государственный университет им. МВ. Ломоносова (МГУ), географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 2009

✉ [vasilch\\_geo@mail.ru](mailto:vasilch_geo@mail.ru)



**Гинзбург Александр Павлович**

младший научный сотрудник, Научный центр изучения Арктики; аспирант, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН

629007, Россия, г. Салехард, ул. Республики, 20

✉ [alexandrginzburg13154@yandex.ru](mailto:alexandrginzburg13154@yandex.ru)



**Токарев Игорь Владимирович**

кандидат геолого-минералогических наук

Ведущий специалист, Ресурсный центр «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета

199034, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Университетская, 7

✉ [tokarevigor@gmail.com](mailto:tokarevigor@gmail.com)



**Буданцева Надежда Аркадьевна**

ORCID: 0000-0003-4292-5709

кандидат географических наук

Старший научный сотрудник, Кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, географический факультет, МГУ имени МВ. Ломоносова

119991, Россия, г. Moscow, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 2007

✉ [nadin.budanceva@mail.ru](mailto:nadin.budanceva@mail.ru)



**Васильчук Алла Константиновна**

ORCID: 0000-0003-1921-030X

доктор географических наук

ведущий научный сотрудник, Московский государственный университет им. МВ. Ломоносова, географический факультет, лаборатория геоэкологии Севера

119991, Россия, г. Moscow, ул. Leninsky Gory, 1, оф. Ж10

✉ [alla-vasilch@yandex.ru](mailto:alla-vasilch@yandex.ru)



**Паламарчук Валентина Анатольевна**

Младший научный сотрудник, Научный центр изучения Арктики и Институт криосферы Земли СО РАН

629007, Россия, г. Салехард, ул. Республики, 20

✉ VAPalamarchuk@yanao.ru

**Блудушкина Любовь Бахтияровна**

младший научный сотрудник, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,  
географический факультет, лаборатория геоэкологии Севера

119991, Россия, г. Город, ул. Ленинские Горы, 1, оф. ж10

✉ bludushkina19@mail.ru

**Слышкина Елена Сергеевна**

младший научный сотрудник, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова;  
географический факультет, лаборатория геоэкологии Севера

119991, Россия, г. Город, ул. Ленинские Горы, 1, оф. ж10

✉ lena.slyshkina@gmail.com



---

[Статья из рубрики "Природные ресурсы Арктики и Антарктики"](#)

**DOI:**

10.7256/2453-8922.2024.1.70079

**EDN:**

ICABMG

**Дата направления статьи в редакцию:**

07-03-2024

**Аннотация:** Наледи являются одним из наиболее опасных природных явлений. Отрицательное воздействие наледей определяется неожиданным затоплением территории и последующим замерзанием воды, формированием ледяных преград, обледенением подземных сооружений и коммуникаций (шахт, штолен, туннелей, водопропускных и канализационных колодцев), а также обледенением автомобильных и железных дорог, береговых гидротехнических сооружений и др. Известны случаи, когда взрывы наледных бугров пучения производили в течение нескольких секунд катастрофические нарушения. Наледь, ежегодно формирующаяся в долине ручья Булуус – одна из наиболее известных и детально изучавшихся наледей Центральной Якутии. Наледный лёд, был отобран из вертикального разреза. Лёд слоистый, мощность слоёв составляет 3–10 см, в верхней части наледи слои льда более мощные, чем в нижней. Отбор образцов льда из наледных толщ было выполнено при помощи стальной коронки

диаметром 5,1 см, приводимой в движение электрической дрелью Bosch. Измерения изотопного состава кислорода и водорода льда выполнены на лазерном инфракрасном спектрометре Picarro L 2130-i. Изотопный состав наледи Булуус заметно варьирует: значения  $\delta^{18}\text{O}$  изменяются от  $-20,2$  до  $-21,9\text{‰}$ , величины  $\delta^2\text{H}$  варьируют от  $-159,5$  до  $-173,7\text{‰}$ . Наледный лед в целом изотопически немного более "тяжёлый" по сравнению с поверхностными водами ручья Улахан-Тарын, значения  $\delta^{18}\text{O}$  составляют  $-22,18\text{‰}$ , а величина  $\delta^2\text{H}$  –  $-175,1\text{‰}$ . Грунтовые воды изотопически близки к водам ручья они также изотопически более "легкие" по сравнению с наледным льдом, в них значения  $\delta^{18}\text{O}$  изменяются от  $-22,17$  до  $-22,25\text{‰}$ , величины  $\delta^2\text{H}$  варьируют от  $-173,7$  до  $-175,1\text{‰}$ .

#### **Ключевые слова:**

наледь, многолетнемерзлые породы, изотопы кислорода, изотопы водорода, Булуус, Улахан-Тарын, река Лена, криогенные почвы, средняя тайга, Центральная Якутия

*Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда (грант № 23-17-00082 - полевые исследования). Изотопные измерения выполнены в Ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета в рамках программы ГЗ №АААА-А19-119091190094-6, при финансовой поддержке правительства Ямало-Ненецкого автономного округа (ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (г. Салехард)*

#### **Введение**

Наледи являются одним из наиболее опасных природных явлений. Отрицательное воздействие наледей определяется неожиданным затоплением территории и последующим замерзанием воды, формированием ледяных преград, обледенением подземных сооружений и коммуникаций (шахт, штолен, туннелей, водопропускных и канализационных колодцев), а также обледенением автомобильных и железных дорог, береговых гидротехнических сооружений и др. Известны случаи, когда взрывы наледных бугров пучения производили в течение нескольких секунд катастрофические нарушения.<sup>[1]</sup> В. Г. Петров<sup>[24]</sup> в марте 1928 г. наблюдал на р. Онон в Амурской области взрыв наледного бугра пучения, во время которого была выброшена глыба льда с грунтом длиной до 19 м, шириной 5 м, толщиной 2 м, массой до 200 т. И. И. Пузанов в 1936 г. на р. Джилинде зафиксировал взрыв, после которого глыбы льдов массой до 50 т были унесены потоком воды на несколько километров. В. Ф. Дершгольц в 1971 г. описал взрыв речной наледи на р. Зее, во время которого погиб караван лошадей вместе с сопровождающими его людьми. 28 марта 1927 г. во время взрыва наледного бугра в долине р. Онон общий объем льдогрунтовой массы, выброшенной взрывом, составил 508 м<sup>3</sup>. Самая большая глыба льда с прослоями песка, гравия и галечника имела толщину 2 м, ширину 6–9 и длину 18 м<sup>[8]</sup>.

Х.Крайтс с соавторами<sup>[36]</sup> исследовали наледи канадской криолитозоны на северо-западе Канады (на территории площадью 618 430 км<sup>2</sup>) на основе 573 снимков Landsat (1985–2017 гг.) определили с использованием гидрометрических данных вклад зимнего базового стока в общий годовой сток 17 рек в исследуемом регионе. Нанесенные на карту 1402 наледи встречаются преимущественно в предгорьях сильно нарушенных карстовых горных районов в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых

пород. Зимний базовый сток и его вклад в годовой расход были ниже в водосборах сплошного распространения многолетнемерзлых пород, чем в зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых пород, но в целом увеличились за период 1970–2016 гг. Распределение наледей, по-видимому, чувствительно к зимним температурам воздуха и условиям зимнего базового стока, а наледи, расположенные на южной границе сплошного распространения многолетнемерзлых пород, более чувствительны к деградации многолетнемерзлых пород и прогнозируемому увеличению зимнего базового стока.

Наледи в бассейне Цо Морири Восточном Ладакхе в Индии были откартированы Д.Бромбирштойдль с коллегами [32] с использованием свободно доступных данных Landsat и Sentinel-2. Всего выявлено 27 наледных полей средней площадью 9 км<sup>2</sup>. Хотя возникновение наледей сильно изменчивы в сезонном и межгодовом масштабе, но наледные тела из года в год образуются в одном и том же месте.

Источником воды для льда наледей могут быть помимо вод реки и грунтовых вод, воды близлежащих ледников. А.МакДональд с соавторами [42] показали, что значительное изменение изотопного состава в реке питающейся из быстро отступающего выводного ледника Виркисйокудль в Исландии фиксируются дважды в год: в летний период (значения  $\delta^{18}\text{O} = -11,2\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H} = -78\text{‰}$ ) и зимой-ранней весной (величина  $\delta^{18}\text{O} = -10,7\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H} = -74,9\text{‰}$ ). Такая закономерность наблюдается и индивидуально для обоих участков мониторинга в реке и указывает на то, что зимний сток частично поддерживается местными грунтовыми водами, хранящимися в моренах.

А.Чеснокова с соавторами [34] исследовала изотопный состав наледей в верховьях долины реки Дьюк в горах Сент-Элиас, Юкон. Результаты исследований показали, что путем изучения гидрологических объектов, которые остаются активными зимой, можно определить гидрологические источники образования наледей и установить вклад различных источников в изучаемые наледи. Как и ожидалось, наледи, образующиеся рядом с окончанием главного ледника, питаются талой водой ледников. Однако даже в окрестностях ледника, очень заметно участие источников воды, не связанных с ледниками, таких как водных притоков на склонах холмов, питаемых грунтовыми водами, погребенных ледниковых образований, и моренных озер. Ниже главных ледников вклад грунтовых и мелких ледниковых притоков более выражен и становится основным источником образования наледей на альпийско-луговой части водораздела. Некоторые склоновые притоки в пределах альпийского луга, по-видимому, питаются водой надмерзлотного слоя. [34]

На изображениях полученные с помощью замедленной камеры А.Чеснокова с соавторами [34] наблюдали наледи в верховьях долины реки Дьюк в горах Сент-Элиас на Юконе, что ледник способствует формированию наледи. Основываясь на этом выводе, они использовали изотопные соотношения второй наледи и ледника на ко-изотопной диаграмме соотношения  $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ . Из-за криогенного фракционирования образцы наледей и образцы исходного источника могут иметь разные изотопные характеристики и потенциально располагаться дальше друг от друга на ко-изотопной диаграмме соотношения  $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ ; эта методология помогла исключить потенциальные ложные результаты. Например, образец из моренного озера нельзя исключить как потенциальный материнский источник Icing PF, поскольку он находится в пределах указанного диапазона, а образец западной морены с ледяным керном располагается

дальше от образца наледи, поэтому его вклад невелик. [34] Изотопный состав наледей в верховьях долины реки Дьук в горах Сент-Элиас на Юконе [34] таков: у первой наледи значения  $\delta^{18}\text{O} \approx -24,2\text{‰}$ , величина  $\delta^2\text{H} \approx -184\text{‰}$ ; у второй наледи значения  $\delta^{18}\text{O} \approx -23,6\text{‰}$ , величина  $\delta^2\text{H} \approx -182\text{‰}$ , при этом вода из скважины продемонстрировала значения  $\delta^{18}\text{O} \approx -22,7\text{‰}$ , величина  $\delta^2\text{H} \approx -175\text{‰}$ , следовательно в составе наледи участвовала вода снега и талая вода ледника.

Береговые гидротехнические сооружения (причалы, эстакады, пирсы и др.) часто разрушаются под воздействием статического давления наледного льда. [1,2,3]

Интерес к изучению наледей вырос в последние годы, [32,34,36,38,40,43,44] так как наледи служат индикаторами водообменных процессов территории занятой многолетнемерзлыми породами и могут играть важную роль при оценке состояния криосферы в условиях меняющегося климата.

Авторами изучен изотопный состав наледи Улахан-Тарын, с целью исследования условий ее формирования.

### **Физико-географические условия района исследования**

#### ***Географическое положение района исследований***

Местом проведения полевых работ был участок, расположенный в районе южной границы Бестяхской террасы на правом берегу р. Лены (рис. 1,а). В рамках территории выделяются два ключевых участка: ручей Улахан-Тарын ( $61^\circ 34' 49.86''$  с.ш.,  $129^\circ 32' 7.64''$  в.д.) и наледь Булуус ( $61^\circ 20' 17.47''$  с.ш.,  $129^\circ 4' 22.13''$  в.д.) (рис. 1,б,в, 2). Участки сосредоточены вдоль автомобильной дороги федерального значения А-360 «Лена», соединяющей г. Сковородино (Невер) Амурской области и г. Якутск.



Рис. 1. Ключевые участки исследования на территории Центральной Якутии: а) примерные границы Бестяхской террасы р. Лены (по [18]); б) долина ручья Улахан-Тарын; в) наледь Булуус; 1 – границы Бестяхской террасы; 2 – Федеральная автодорога А-360 «Лена»; 3 – ключевые участки исследования

#### *Рельеф*



Бестяхская терраса – IV надпойменная терраса р. Лены, она имеет относительные высоты 56–78 м над средним уровнем воды в реке и занимает большую часть запада Лено-Алданского междуречья (рис. 1,а). Терраса сложена преимущественно аллювиальными песчаными отложениями (мощность 60–70 м), с мощными прослоями щебней и галек (мощность 1–3 м).<sup>[18]</sup> Считается, что в качестве самостоятельного геоморфологического элемента территории Бестяхская терраса выделилась в позднем плейстоцене – голоцене, значительную роль в её обособлении сыграл комплекс перигляциальных процессов, в особенности гляциоизостатических поднятий.<sup>[28]</sup> Генезис террасы спорный.<sup>[25]</sup> Современный рельеф поверхности террасы – возвышенно-равнинный, сильно расчленённый глубокими врезами, имеющими термоэрозионное и суффозионное и термосуффозионное происхождение.<sup>[22,25]</sup> Деятельность подземных вод во многом определяет формирование здесь характерного термосуффозионного рельефа в виде полузамкнутых цирков, верхние бровки которых возвышаются над днищами ручьёв на 20–30 м, а угол откоса их склонов составляет около 30°. <sup>[12]</sup> В настоящий момент зафиксировано затухание термосуффозионных процессов,<sup>[12]</sup> которое сопровождается постепенным зарастанием песчаных надпойменных террас рек в бассейне Лены и её крупных притоков. <sup>[12,23]</sup>

#### *Многолетнемёрзлые породы*

Многолетнемёрзлые породы в Центральной Якутии имеют сплошное распространение, характеризуются высокой мощностью, средней льдистостью и в целом относительно стабильным состоянием.<sup>[20]</sup> Средние температуры многолетнемёрзлых пород на глубине нулевых сезонных колебаний составляют около –4 – –3°C. Песчаные массивы и участки возвышенных надпойменных террас, сложенных песками, при этом характеризуются специфическим тепловым режимом, который отличается весьма высокими температурами – до –0,2°C. Мощность криолитозоны здесь составляет примерно 200 м, в некоторых местах возраста практически вдвое.<sup>[5,22]</sup> Строение толщи ММП на Бестяхской террасе двухслойное, два мёрзлых горизонта разделяются межмерзлотным таликом.<sup>[9]</sup> Мощность деятельного слоя на песчаных водоразделах достигает 3,5 м, в низинах, сложенных более тяжёлыми отложениями, где так же присутствуют мощные торфяники, она снижается до 1–1,5 м.<sup>[20]</sup>

#### *Климатические характеристики*

Территория характеризуется резко-континентальным климатом. Характерны длительная холодная и малоснежная зима, короткое и очень жаркое лето. Среднегодовая температура воздуха в с. Покровск (50 км к югу от г. Якутска) – ближайший к месту исследований крупный населённый пункт, – составляет –9,6°C. Самый тёплый месяц года – июль, в течение которого в среднем за 90 лет метеонаблюдений (1933–2023 гг.) составила 18,4°C, самый холодный – январь, среднемноголетняя температура которого равна –39,8°C. В течение всего срока метеонаблюдений выделяются две основных особенности: среднегодовая температура воздуха варьировала в пределах от –8,0 до –12,0°C в период с 1933 по 1990 гг., а начиная с 1990 г. наблюдался рост среднегодовой температуры воздуха, а также значительное уменьшение её годовых амплитуд.

Среднее количество выпадающих в течение года атмосферных осадков невелико, оно типично для резко-континентального климата и составляет 200–300 мм/год. В начале периода систематических метеонаблюдений в аномальные годы выпадало осадков в год до 600–800 мм и более, однако на протяжении последних практически 70 лет среднее

количество осадков, выпадающих на этой территории равно 292 мм/год (рис. 2).

По агроклиматическому районированию Лено-Алданское междуречье относится к наиболее теплообеспеченным районам Якутии, в которых годовые суммы среднесуточных активных температур ( $10,0^{\circ}\text{C}$  и выше) превышают  $1200^{\circ}\text{C}$ , а безморозный период года длится более 90 дней. В результате этого исследуемый район – одно из немногих мест на территории Якутии вообще, где возможно ведение пахотного земледелия. [6]

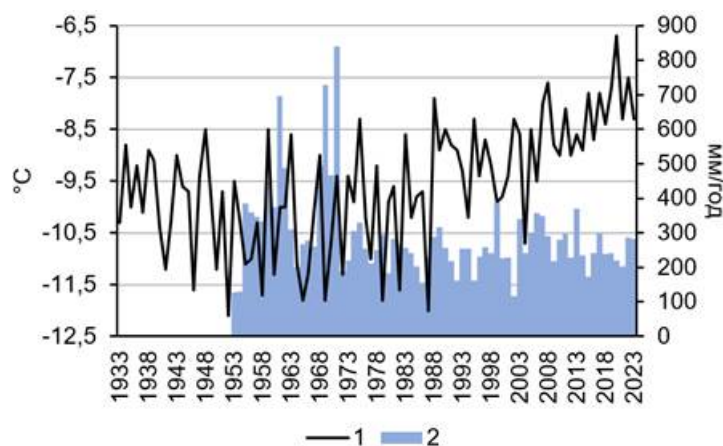


Рис. 2. Климатические характеристики в с. Покровск в период с 1933 по 2023 гг. (по данным метеостанции Покровск, Якутия [19] – систематические измерения уровня выпавших атмосферных осадков проводятся только с 1951 г.). 1 – температура воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ ; 2 – уровень атмосферных осадков, мм/год

#### *Гидрологические и гидрохимические характеристики и ледовые явления на реках*

Лена – крупнейшая река Якутии, а также всей Восточной Сибири, и одна из самых крупных рек России. Длина её основного русла более 4 600 км. Исток Лены расположен в небольшом болоте на плато Солнцепадъ в Восточном Прибайкалье, устье – на побережье Северного Ледовитого океана, где река образовала обширную дельту – также одну из крупнейших среди рек России и мира (площадью около 60 000 км<sup>2</sup>). [33] Годовой сток Лены, по разным оценкам, составляет от 489 до 542 км<sup>3</sup>, что соответствует среднегодовым расходам от 15 500 до 17 175 м<sup>3</sup>/с. [26] Повсеместное развитие стабильных ММП в долине р. Лены осложняет её питание подземными водами, однако в дельте Лены в последние годы этот компонент питания в структуре речного стока занимает всё большие и большие доли. [33]

В зимний период Лена покрывается льдом в направлении с севера на юг, достигается значительная мощность льда (около 5 м и более). Стабильный ледостав характерен в период с середины ноября по вторую половину мая. Весенний ледоход сопровождается частыми мощными заторами льда и сопутствующим затоплением прибрежных территорий. [11,17]

Между точками впадения в Лену крупных притоков – Олёкмы (2 089 км от устья) и Алдана (1 311 км от устья) крупные притоки отсутствуют, в основном в неё впадают мелкие реки и ручьи. Многочисленные выходы подземных вод в тыловых швах склонов надпойменных террас и разгрузка их в русла ручьёв приводит к образованию многочисленных наледей. [7] Наледь, ежегодно формирующаяся в долине ручья Булуус – одна из наиболее известных и детально изучавшихся наледей Центральной Якутии [4,13,21,31] (рис. 3,4). Кроме того, она является популярным у туристов природным

явлением. После установления стабильных положительных температур воздуха наледь тает ещё относительно долгое время. Так, в июне-июле площадь поверхности наледи составляет около 0,3–0,4 км<sup>2</sup>, а остаток наледи может сохраняться практически в период до начала августа (рис. 3, а-г). В начале летнего сезона мощность наледи на ручье Булуус достигает 3–5 м, а в середине июля существенно уменьшается – и составляет уже 1–1,5 м.

Наледь Булуус отнесена к одному из семи чудес Якутии. Общая площадь наледи составляет 1105 га. Уникальный источник подземных вод образует здесь наледи чистой пресной воды, которые не тают даже в самые жаркие дни. На льду температура воздуха не поднимается выше +4–6°C. Лед представляется совершенной фантастикой жарким летним днём среди зелёной травы и высоких хвойных деревьев. Летом в леднике образуются многочисленные расщелины и пещеры. Зимой даже в суровые морозы на поверхности видны выходы талой воды.

Бывает, что к осени наледь Булуус тает полностью, а в 2020 г. Булуус полностью растаял совсем рано — в конце июля, в 2022 г. Булуус растаял в конце августа. По наблюдениям Л.А. Гагарина [\[12-14\]](#) долина, где находится Булуус, относительно узкая. За зиму здесь формируется наледь с большой толщиной и маленькой площадью. И того количества тепла, которое летом приходится на эту поверхность, недостаточно, чтобы быстро растопить такой объем льда. Если бы Булуус был пошире и потоньше, он бы таял раньше, т.е. как долго здесь будет таять лед, зависит от его толщины и площади. Чем толще и меньше по площади, тем он дольше продержится. И, соответственно, чем лед тоньше и шире, тем он быстрее будет таять.

А какой толщины и площади будет эта наледь, зависит от трех факторов — высоты снежного покрова, температуры зимой и количества осадков, выпавших предыдущим летом-осенью. Если снега мало и зима холодная, вода из природного источника быстро замерзает, не успев растечься по поверхности. А если снега много и зима относительно теплая, вода долго перемещается вниз по руслу, перед тем как замерзнуть. Площадь льда увеличивается, но при этом его толщина совсем небольшая. При этом наледь тает быстрее.

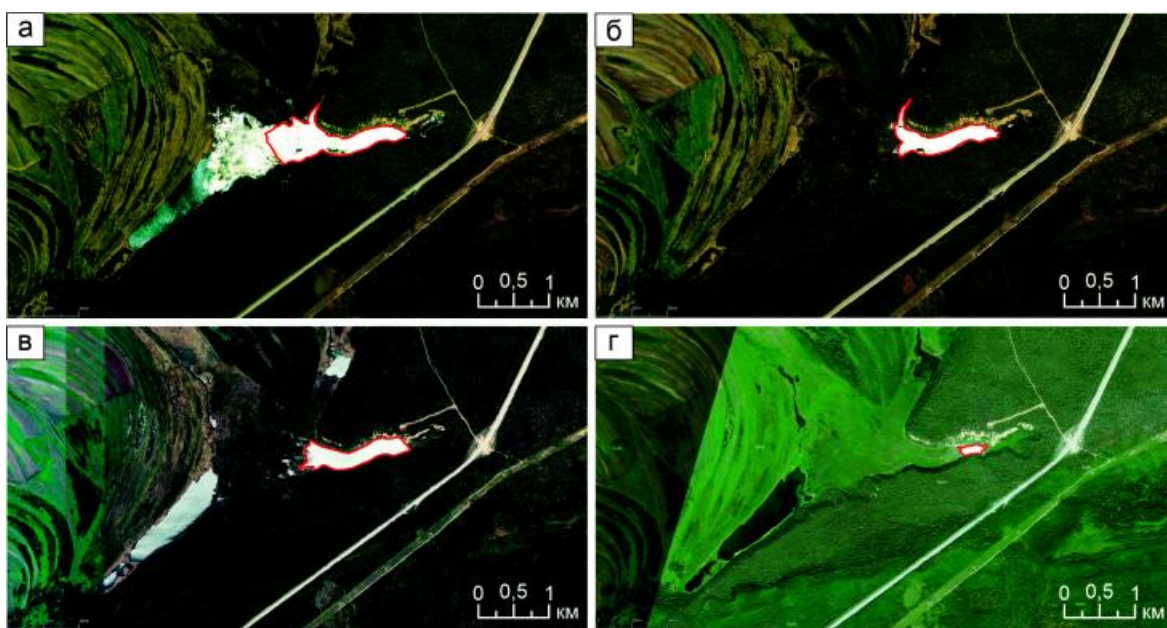


Рис. 3. Границы наледи Булуус на разновременных космических снимках: а) в конце мая 2022 г; б) в середине июня 2022 г; в) в начале июля 2022 г; г) в начале августа 2022 г;



1 – границы площади наледи



Рис. 4. Внешний вид долины ручья Булуус, поверхность наледи и окружающий среднетаёжный ландшафт в начале июля 2023 г. (фото А.П. Гинзбурга)

*Почвенный покров территории*

Район работ расположен в среднетаёжной ландшафтной подзоне, поэтому доминирующим типом почв на Лено-Алданском междуречье считаются мерзлотно-таёжные палевые, в т.ч. осолоделые в комплексах с аласных почв.<sup>[6,30]</sup> Непосредственно на западной части Бестяхской террасы на карте из этого атласа выделяется ареал мерзлотных подзолистых почв и борových песков. Согласно А.П. Чевычелову<sup>[29]</sup> территория Центральной Якутии характеризуется сложным почвенным покровом, в который включено 9 зональных, 2 азональных и 7 интразональных типов почв (табл. 1). Такое разнообразие почв обеспечено большому количеству разнообразных почвообразовательных макропроцессов, которые также протекают на фоне криогенеза различной степени, что характерно в целом для Якутии как на талых, так и на многолетнемёрзлых подстилающих породах.<sup>[35]</sup>

**Таблица 1.** Систематический список типов криогенных почв Центральной Якутии (по А.П.Чевычелову<sup>[29]</sup>)

| Зональные              | Азональные                 | Интразональные                  |
|------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 1. Подзолы             | 1. Дерново-карбонатные     | 1 . Аллювиальные слоистые       |
| 2. Солоди              | 2 . Перегнойно-карбонатные | 2 . Аллювиальные серогумусовые  |
| 3. Палево-бурые        |                            | 3 . Аллювиальные темногумусовые |
| 4. Палевые             |                            | 4. Болотные низинные            |
| 5. Чернозёмы           |                            | 5. Сапропели                    |
| 6 . Лугово-чернозёмные |                            | 6. Солончаки                    |
| 7 . Чернозёмно-луговые |                            | 7. Солонцы                      |
| 8. Дерново-луговые     |                            |                                 |

|                    |  |  |
|--------------------|--|--|
| 9. Лугово-болотные |  |  |
|--------------------|--|--|

Особенностью почвенного покрова водоразделов Центральной Якутии являются значительные площади, занятые аласными экосистемами,<sup>[27]</sup> в пределах которых ведутся основные сельскохозяйственные мероприятия.<sup>[16]</sup> В аласных котловинах наблюдаются гидро- и галоморфные комплексы почв, почвенный покров аласов представлен солодами, лугово-чернозёмными и чернозёмно-луговыми, лугово-болотными почвами.<sup>[15]</sup> Аласные экосистемы, а также окружающие их водоразделы с мерзлотно-таёжными почвами и соответствующей лесной растительностью, активно деградируют в связи с климатическими изменениями и образованием глубоких термокарстовых провалов в едомных отложениях.

### **Объекты и методы**

#### ***Изученные наледи***

Наледный лёд, изученный на ключевом участке в долине ручья Булуус, был отобран из вертикального обнажения, вскрытого в результате естественного бокового оттаивания наледного льда (рис. 5,6). Проведённая зачистка обнажения показала, что наледный лёд имеет следующие характерные особенности: лёд слоистый, чередуются слои прозрачного слегка голубоватого и зеленоватого на просвет плотного льда с небольшим количеством визуально выделяющихся пузырьков воздуха со белыми практически не прозрачными более ломкими слоями, содержащими большое количество пузырьков воздуха и слабо связанных ледяных зёрен. Мощность слоёв составляет 3–10 см, в верхней части наледи слои более мощные, чем в нижней (см. рис. 6). Примерно на глубине 65 см от поверхности лёд слегка загрязнён крупным и средним палево-жёлтым песчаным материалом. Поверхность наледи также содержит мелкий и средний песок, появление которого на ней, вполне возможно, объясняется эоловым переносом минеральных частиц с окружающих долину ручья Булуус незадернованных склонов террас (см. рис. 5). В остальном, визуально выраженного загрязнения льда частицами грунта или иными веществами не выявлено.



Рис. 5. Основное русло ручья Булуус и образовавшаяся в теле наледи промоина в начале июля 2023 г. (фото В.А. Паламарчук)



Рис. 6. Вертикальное обнажение наледного льда на ручье Булуус (фото В.А. Паламарчук)

#### ***Полевой отбор образцов наледного льда***

Отбор образцов льда из наледных толщ было выполнено при помощи стальной коронки диаметром 5,1 см, приводимой в движение электрической дрелью Bosch. Образец льда высверливался из вертикальной стенки наледной толщ, причём верхние 1,5-2 см каждого керна снимались во избежание попадания в образец натёчного льда, изотопный состав которого был изменён в результате длительного контакта с атмосферным воздухом. Масса каждого образца льда составляла 100-150 г. После оттаивания при

комнатной температуре в течении суток талая вода переливалась в пластиковые флаконы объёмом 10 мл. Флаконы предварительно два раза промывались пробой воды, а воздухообмен с атмосферой исключался путём герметизации крышки флакона эластичной плёнкой Parafilm. Также при заливании пробы воды предотвращалось попадание пузырьков воздуха во флакон. Всего из наледи было отобрано 7 образца льда.

Таблица 2. Отбор образцов из толщи наледи, Булуус, Улахан-Тарын, Центральная Якутия, июль 2023 г.

| №  | Полевой номер | Глубина, см | Тип пробы          |
|----|---------------|-------------|--------------------|
| 1  | Ultar-23-1/1  | 0           | Поверхностные воды |
| 2  | Ultar-23-4/1  | 0           | Грунтовые воды     |
| 3  | Ultar-23-5/1  | 0-10        | Наледь             |
| 4  | Ultar-23-5/2  | 10-20       | Наледь             |
| 5  | Ultar-23-5/3  | 20-30       | Наледь             |
| 6  | Ultar-23-5/4  | 30-40       | Наледь             |
| 7  | Ultar-23-5/5  | 40-50       | Наледь             |
| 8  | Ultar-23-5/6  | 50-60       | Наледь             |
| 9  | Ultar-23-5/7  | 60-70       | Наледь             |
| 10 | Ultar-23-6/1  | 0           | Грунтовые воды     |

### **Лабораторные изотопные исследования наледного льда**

Измерения изотопного состава кислорода и водорода льда выполнены на лазерном инфракрасном спектрометре Picarro L 2130-i в Ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета. Использованы следующие международные стандарты: V-SMOW-2, GISP, SLAP, USGS-45 и USGS-46. Погрешность определений составила: для  $\delta^{18}\text{O}$  –  $\pm 0,02$  ‰, для  $\delta^2\text{H}$  –  $\pm 0,3$  ‰. Значения дейтериевого эксцесса ( $d_{\text{ex}}$ ) были рассчитаны по формуле В.Дансгора<sup>[37]</sup>:  $d_{\text{ex}} = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$ .

### **Результаты**

**Изотопный состав наледного льда.** Изотопный состав наледных льдов наледи Булуус мало варьирует: значения  $\delta^{18}\text{O}$  изменяются от  $-20,2$  до  $-21,9$ ‰, величины  $\delta^2\text{H}$  варьируют от  $-159,5$  до  $-173,7$ ‰ (табл. 3). Наледный лед в целом изотопически немного более “тяжёлый” по сравнению с поверхностными водами ручья Улахан-Тарын, значения  $\delta^{18}\text{O}$  составляют  $-22,18$ ‰, а величина  $\delta^2\text{H}$  –  $-175,1$ ‰. Грунтовые воды изотопически близки к водам ручья они также изотопически более “легкие” по сравнению с наледным льдом, в них значения  $\delta^{18}\text{O}$  изменяются от  $-22,17$  до  $-22,25$ ‰, величины  $\delta^2\text{H}$  варьируют от  $-173,7$  до  $-175,1$ ‰.

Таблица 3. Изотопный состав наледи, Булуус, Улахан-Тарын, Центральная Якутия, июль 2023 г.

| Полевой номер | Глубина, см | Тип пробы          | $\delta^{18}\text{O}$ , ‰ | $\delta^2\text{H}$ , ‰ |
|---------------|-------------|--------------------|---------------------------|------------------------|
| Ultar-23-1/1  | 0           | Поверхностные воды | $-22,18$                  | $-175,1$               |



|              |       |                |        |        |
|--------------|-------|----------------|--------|--------|
| Ultar-23-4/1 | 0     | Грунтовые воды | -22,17 | -173,6 |
| Ultar-23-5/1 | 0-10  | Наледь         | -20,4  | -161,1 |
| Ultar-23-5/2 | 10-20 | Наледь         | -20,1  | -159,5 |
| Ultar-23-5/3 | 20-30 | Наледь         | -21,2  | -166,6 |
| Ultar-23-5/4 | 30-40 | Наледь         | -22,2  | -173,7 |
| Ultar-23-5/5 | 40-50 | Наледь         | -20,8  | -164,9 |
| Ultar-23-5/6 | 50-60 | Наледь         | -20,2  | -160,9 |
| Ultar-23-5/7 | 60-70 | Наледь         | -21,9  | -170,7 |
| Ultar-23-6/1 | 0     | Грунтовые воды | -22,25 | -173,7 |

### Дискуссия

**Изученность наледей.** Изучение наледей начато А.Ф.Миддендорфом, Г.Л.Майделем, К.Дитмаром, С.А.Подъяконовым еще в середине XIX в. В развитие наледеведения большой вклад внесли В.Р.Алексеев, А.П.Горбунов, М.И.Сумгин, Н.И.Толстихин, В.Г.Петров, А.М. Чекотилло, Д.Лассель, Ф.Майкл, К.Йошикава и др. Установлены факторы наледообразования: естественная гравитационная разгрузка бассейнов подземных вод; промерзание водоносных систем с образованием криогенного напора; приложение внешней нагрузки на ледяной покров; колебания расходов подналедных водных потоков; таяние снега и льда в условиях частого перехода воздуха через 0<sup>о</sup>С; водопитоки на охлажденный берег в результате периодических и непериодических приливов; сброс промышленных и бытовых вод в холодное время года. По ориентировочным данным суммарная площадь наледей на территории Сибири составляет около 130 000 км<sup>2</sup>.<sup>[1,2]</sup> По размерам наледи изменяются от очень мелких (площадь до 103 м<sup>2</sup>, объем до 103 м<sup>3</sup>) до гигантских (площадь более 107 м<sup>2</sup>, объем более 2,2×107 м<sup>3</sup>). По времени существования выделяются однолетние (полностью оттаивающие летом), летующие (существующие до конца лета), многолетние (существующие несколько лет), наледи.

Основное внимание обычно привлекают крупные ледяные поля, формирующиеся за счет излияния и последующего намораживания подземных вод. Как правило, такие массивы льда «нанизаны» на русла рек, имеют округлую конфигурацию и распространяются на всю ширину днища долины, отделяясь, друг от друга значительными расстояниями. Изучению наледей других генетических типов (речных, талых снеговых, озерных вод) посвящено относительно небольшое число работ. Вследствие этого сложилось мнение, что на реках Сибири и Дальнего Востока наледи, хотя и имеют большие размеры, но встречаются локально, т.е. не образуют сплошных ледяных покровов по длине водотоков. Например, в Каталогах наледей зоны БАМ, отражены характеристики более 4000 наледей подземных вод, зафиксированных специальной аэрофотосъемкой на территории 260000 км<sup>2</sup>. Все они демонстрируют дискретный характер распределения ледяных массивов. Между тем, наблюдения на сибирских реках<sup>[3]</sup> показали, что наледи имеют более широкое распространение, и что происхождение их носит гетерогенный характер.

В суровых климатических условиях Азиатской части России, особенно к востоку от Енисея, в зоне распространения многолетнемерзлых пород с её исключительно бедным грунтовым питанием, наблюдается перемерзание рек до дна. В руслах рек Восточной Сибири и других районов зимой нередко наблюдается висячий ледяной покров, так называемый «сушняк»; он образуется при снижении уровня воды вследствие истощения питания реки и, главным образом, уменьшения запасов грунтовых вод.

Вследствие стеснения русла при ледоставе, иногда наблюдается выход воды через трещины на лед, в результате чего образуются наледи больших или меньших размеров. Наледи, наблюдаемые на реках Европейской части России, невелики и по своим размерам чаще всего не превышают по площади 1 км<sup>2</sup>. В Азиатской части России, особенно в Восточной Сибири, широко распространены гигантские наледи, называемые по-якутски "тарыны", площадь которых достигает иногда несколько десятков квадратных километров, а объем исчисляется десятками и сотнями миллионов кубических метров. При этом льдом заполняется не только русло, но нередко и всё дно долины.

Площадь Момской наледи в долине р. Момы (приток Индигирки) достигает 160-180 км<sup>2</sup>, а объем - 500-600 млн. м<sup>3</sup>, Кырская наледь (долина р. Кыры) имеет площадь до 28 км<sup>2</sup>, а объем - до 38 млн. м<sup>3</sup>. Подобные мощные ледяные хранилища вод, стаивая летом, оказывают существенное влияние на меженное питание рек. При объеме наледи в 38 млн. м<sup>3</sup> река за 3-4 летних месяца получит за счет таяния льда дополнительное питание в среднем 4-5 м<sup>3</sup>/сек; Момская наледь дает 16-20 м<sup>3</sup>/сек.

На реках Восточной Сибири наряду с гигантскими наледями встречаются незамерзающие участки и полыньи (по-якутски - аймы). На р. Омолон, например, в зиму 1928/29 г. 20-30% общей поверхности русла не было покрыто льдом; то же явление отмечено на р. Коркодон и других водотоках.

В пределах горного пояса Восточного Саяна и Хамар-Дабана встречаются крупные наледные поля речных, подземных вод и смешанного типа, практически ежегодное формирование которых обусловлено резко континентальным суровым климатом, большой продолжительностью зимнего сезона, наличием многолетнемёрзлых пород, достаточно высокими запасами подземных вод и промерзанием рек. Наледи речных вод наиболее часто встречаются в руслах рек, пересекающих межгорные впадины и равнины.

Здесь они следуют друг за другом почти без перерывов, образуя широкие ледяные ленты длиной до 70 км и мощностью до 1,5 м. Формирование их обычно прекращается в ноябре-декабре. Наледи подземных вод (грунтовые и ключевые), приурочены чаще всего к распадкам гор и ущельям и имеют мощность 3-4 м. Иногда встречаются висячие наледи, а также погребенные под тонким слоем делювия.<sup>[1]</sup> Нередко наледный лед перемещает достаточно крупные обломки и даже валуны на большое расстояние по реке (рис. 7).



Рис. 7. Крупные валуны вмерзшие в нижнюю часть речной наледи на р.Моме. Фото С.Карпухина

Результаты натурных исследований на р. Уде, в районе впадения в нее р.Нерхи, дали возможность описать механизм образования речных наледей. Наибольшее распространение в исследуемом регионе получили наледи, образованные при перемерзании большинства малых рек длиной до 30-50 км и на некоторых водотоках

длиной до 100-150 км. Главной причиной образования таких наледей является возникновение дополнительного напора в связи с уменьшением пропускной способности русла при нарастании льда или увеличении водности потока. Механизм излияния вод, образующих напорные наледи, сходен с механизмом образования наледей речных вод. Различия состоят лишь в особенностях деформации льда и водонасыщенного мерзлого грунта который, обладая достаточной жесткостью, деформируется незначительно, что приводит к приращению напора по длине подруслового потока при его промерзании. Этот напор распространяется к не промерзшим участкам рек, где и происходит излияние наледных вод. Наиболее интенсивно наледные процессы развиваются в гольцовом поясе горных хребтов Восточного Саяна. Большинство ледяных массивов, их суммарная площадь и объем приурочены к абс. высотам 1200–1600 м. Здесь же фиксируются максимальные значения мощности наледей.

В.Р.Алексеевым, О.А.Ковальчук, В.В.Кравченко и сотрудниками лаборатории гляциологии Института географии СО РАН выполнены долгосрочные режимные наблюдения в Саянах на водотоках различного порядка: бассейна реки Уды, рек Эгеги и Эдена (на полигонах Эден, Шаманка и Синий Камень). Стационарные наблюдения позволили исследовать основные закономерности нарастания и стаивания наледного льда в горной области Восточного Саяна, определить долю наледного питания в подземном и речном стоке, оценить значение наледных процессов перераспределении природных вод.

Рост наледей здесь начинается в конце октября - начале ноября. Наиболее интенсивный рост наледей связан с условиями их питания и происходит во второй половине зимы. Средний объем наледей подземных вод постепенно увеличивается с повышением высоты местности, достигая своего максимума у верхней границы леса. Здесь же фиксируется и наибольшая площадь ледяных полей. Ограниченно развиты речные наледи в гольцовом и подгольцовом поясах, в связи с наличием мощного снежного покрова, активное, но непродолжительное наледообразование в прибортовых частях долины.<sup>[2]</sup>

Процесс разрушения наледей начинается с середины апреля и заканчивается в июле – августе. Интенсивность таяния больше в начальный период. Основными факторами разрушения наледей являются количество поступающего на поверхность наледи тепла, механическое воздействие водных потоков и атмосферных осадков. Ежегодное формирование наледей обеспечивает ступенчатость продольного профиля русла, приводит к нивелировке наледного ложа и расширению днища долины. Из-за этого происходит смещение наледных полей вверх или вниз по течению реки. В связи с развитием процессов наледной денудации происходит разрушение береговых уступов и их отступление, вследствие чего размеры наледной поляны постепенно увеличиваются (скорость отступления в среднем 20-30 см в год, в отдельных случаях до 100 см и более).

Наледи и наледные процессы сопровождаются серией опасных явлений природы - пучением грунтов, суффозией, солифлюкцией, термокарстом.<sup>[1]</sup> Среди сопутствующих наледям явлений отмечаются бугры пучения и гидролакколиты. Большой интерес вызвали полости в ледяном покрове наледных рек, образованных, вследствие тонкослойного намораживания воды по бортам долины и сближения образующихся при этом мощных ледяных массивов.

Стационарные наблюдения за процессами наледообразования в Прибайкалье проводились в 2004-2006 гг.. сотрудниками Иркутский, Читинской и Бурятской гидрометеослужб на двух наблюдательных участках: - участок «Култук» (район поселка

Култук Иркутской области) в 7 очагах: падь Синюха, р. Тигунчиха, падь Лесная, падь 1-Воротная, падь 2-Воротная, ул. Школьная, р. Медлянка-1, Медлянка. В 2006 г. на этом участке образование наледей происходило в основном за счет техногенного нарушения поверхностного и подземного стока. В зимний период из-за того, что по руслу р. Медлянка была накатана автодорога, произошло промерзание русла реки с образованием наледи, которая залила более 10 приусадебных участков и угрожала зданию школы на ул. Кирова. Образование второй наледи связано с нарушением естественного стока при строительных работах на железной дороге. Наледообразование в долине р. Тиганчиха было связано со слабой пропускной способностью моста на федеральной автодороге. В 2006 г. наледь подтопила несколько жилых домов, магазин, хозяйственные постройки и территорию, прилегающую к автобазе.

По результатам обследования трассы Восточно-Сибирской железной дороги наиболее высокая степень пораженности наледными процессами выявлена на перегоне пос. Выдрино – пос. Тимлюй, где наледи встречаются в среднем через каждые 10 км трассы. Мостовые переходы железнодорожных путей перекрыты наледным льдом на 40-90%; защитные мероприятия проводятся железнодорожными службами и сводятся к отсыпке противоналедных дамб, рыхлению и околке льда под мостами, прорубки траншей и канав для отвода воды. Мероприятия эти малоэффективны и применяются как временные меры по снижению активности воздействия процесса на железную дорогу, но требуют немалых трудовых и материальных затрат ежегодно. На перегоне пос. Тимлюй – г. Улан-Удэ в 2006 г. наледи наблюдались вдоль русел небольших рек Тимлюйка, Поперечная, Чернушка, Мостовка, руч. Ошурково. В целом в результате проведенного обследования трассы ВСЖД можно отметить приуроченность наледей к руслам малых горных рек, где площади наледных тел составляют от 0,1 до 2 км<sup>2</sup>. В большинстве случаев возникновение наледей провоцируется созданием искусственных преград речному стоку при строительстве насыпей железных и автомобильных дорог, зарегулировании стока для мелиоративных целей и т.д.

В.Р. Алексеевым<sup>[1,2]</sup> показано, что для изучения наледных явлений можно получать оперативные данные о состоянии наледей посредством краткосрочных наземных, аэровизуальных и авиадесантных наблюдений, а также аэро- и космической съемки, с использованием характерных признаков и свойств криогенных природных комплексов. По материалам многолетних исследований наледей и наледных процессов на специальных гляциологических полигонах в Забайкалье и Восточном Саяне подготовлен атлас ландшафтных индикаторов, включающий их характеристики, типичные виды наледей и наледных ландшафтов.

По наблюдениям Н.А.Павловой и В.В.Шепелева<sup>[31]</sup> в верховье урочища Булуус осыпание и выполаживание склонов с последующим залесением дна долины ручья способствовали новообразованию многолетнемерзлых пород. О процессе постепенного промерзания краевой части талика свидетельствует миграция мест выходов подземных вод из головной части распадка в его среднюю часть. Ухудшению водообмена в верховье урочища способствует и режим формирования наледи. Детальные наблюдения за ростом и таянием наледи в урочище Булуус выполнены сотрудниками Института мерзлотоведения СО РАН в 1960-х гг.<sup>[31]</sup> В последнее десятилетие проводились лишь разовые замеры мощности наледи в декабре и в марте. Наледообразование в распадке начинается в его верховье за счет промерзания рассредоточенных малodeбитных источников. На остальной площади до второй декады декабря наледь не формируется. По сравнительно глубоко врезанному руслу ручья вода из высокодебитных источников стекает в старичное озеро, расположенное на низкой надпойменной террасе р. Лены. В

январе–феврале после промерзания основного русла ручья начинается усиленный рост наледи. Темп наращивания ее мощности и объема в средней и нижней частях распадка значительно превосходят скорость наледеобразования в его верховье. Поэтому максимальная мощность наледи к концу зимы достигает 4–6 м в районе родников, а в головной части распадка менее 0.5 м. Наледь оказывает тепляющее действие на подстилающие грунты. Соответственно, ее тепловой эффект минимален в верховье распадка Булуус, где отмечается наименьшая мощность наледи и разгрузка подземных вод прекращается в первой половине зимы. [\[31\]](#)

Подпор формирующейся наледью и промерзание пород в районе рассредоточенных малодобитных источников способствуют разъединению водоносного горизонта на отдельные талые “карманы”, состав воды в которых, по мнению В.В.Шепелёва [\[31\]](#) преобразуется за счет криогенной метаморфизации.

В результате многолетних исследований источников подземных вод Улахан-Тарын Л. А. Гагариным с коллегами [\[13\]](#) установлено, что область питания подземных вод межмерзлотного водоносного горизонта приурочена частично к аласному и межаласному типам местности и преимущественно к песчано-грядовому. В первых двух типах местности гидравлическая связь поверхностных вод с межмерзлотным водоносным горизонтом осуществляется через сеть водопоглощающих подозерных таликов. В песчано-грядовом типе местности инфильтрационное питание межмерзлотного водоносного горизонта происходит как через субаквальные (подозерные), так и субаэральные надмерзлотные талики. Здесь же расположена и область транзита подземных вод. В ее пределах межмерзлотный водоносный талик неоднократно был вскрыт разведочными скважинами на глубинах 24–36 м под толщей ММП. Мощность талика не выдержана и изменяется от 8 до 25 и более м. Наличие перекрывающего и подстилающего криогенного водоупора определяет напорный режим фильтрации межмерзлотных вод, уровень которых устанавливается в скважинах на 24–34 м выше кровли водоносного горизонта. Вблизи зоны разгрузки подземных вод глубина залегания межмерзлотного водоносного горизонта составляет 16–27 м, мощность его увеличивается до 32–56 м, а напор межмерзлотных вод не превышает 7–12 м. Зимой практически сухие пески сезонноталого слоя (весовая влажность не более 5%) в песчано-грядовом типе местности обеспечивают низкую теплопроводность мерзлых горных пород, а в теплый период года быстрая инфильтрация талых снеговых вод и атмосферных осадков, сопровождающаяся увеличением теплопроводности песков, способствует глубокому их протаиванию – до 4–5 м. Межмерзлотный водоносный горизонт – является крупным источником тепла, также вносит значительный вклад в формирование температурного режима пород. Об этом свидетельствуют высокие значения среднегодовой температуры ММП (до  $-0.2^{\circ}\text{C}$ ), перекрывающих межмерзлотный водоносный горизонт, и сокращение мощности слоя годовых теплооборотов вплоть до совпадения его с мощностью слоя сезонного протаивания пород. [\[13\]](#)

К.Йошикава с соавторами [\[45\]](#) установили, что источником зимнего стока в восточной части хребта Брукс на Аляске являются преимущественно родниковые воды внутри- и подмерзлых водоносных горизонтов. Сравнение современных и исторических изображений наледей показало, что, хотя размер наледей варьирует от года к году, общее расположение остается почти постоянным.

Изучение наледной активности имеет важное практическое значение при оценке наледной опасности на трассах автозимников, на участках проектирования и строительства мостов, ледовых переправ, трубопроводов, при прогнозировании



весенних паводков и ледяных заторов, при общей оценке проходимости территории и т.д.

### ***Вариации изотопного состава льда наледей***

Как уже сказано, изотопный состав наледи Булуус (Улахан-Тарын) мало варьирует: значения  $\delta^{18}\text{O}$  изменяются от  $-20,2$  до  $-21,9\text{‰}$ , величины  $\delta^2\text{H}$  варьируют от  $-159,5$  до  $-173,7\text{‰}$ . Напомним, что изотопный состав наледных льдов на реке Вилюй также варьирует в очень узком диапазоне<sup>[10]</sup>: а) наледь 1 – значения  $\delta^{18}\text{O}$  изменяются от  $-19,3$  до  $-20,9\text{‰}$ , величины  $\delta^2\text{H}$  варьируют от  $-156,5$  до  $-162,9\text{‰}$ ; б) наледь 2 – значения  $\delta^{18}\text{O}$  изменяются от  $-19,7$  до  $-22,4\text{‰}$ , величины  $\delta^2\text{H}$  варьируют от  $-153,2$  до  $-173,1\text{‰}$ ; в) наледь 3 – значения  $\delta^{18}\text{O}$  изменяются от  $-19,8$  до  $-22,7\text{‰}$ , величины  $\delta^2\text{H}$  варьируют от  $-162,9$  до  $-181,3\text{‰}$ .

Заметим, что изученный фрагмент наледи Булуус (Улахан-Тарын) является только нижней частью наледи. Как уже сказано, наледь достигает мощности 3 м в конце зимы; на момент исследования (начало июля) мощность наледи составляла 115 см (см. рис. 5), поэтому изученный фрагмент это примерно половина первоначальной наледи. При этом для изотопных определений отобраны только верхние 70 см оставшейся части наледи, нижний фрагмент мощностью 45 см не опробован. В итоге можно рассматривать изотопное распределение только в определенном фрагменте наледи (придонный фрагмент не отобран, верхняя часть стаяла).

Мы предположили, что формирование наледного льда происходило, наиболее вероятно, при промерзании грунтовых вод в условиях закрытой системы (подобной приводимой Д.Ласселем<sup>[39]</sup>), нарастание наледи шло снизу-вверх, при послойном намерзании порций воды и рассчитали модельное распределение значений  $\delta^{18}\text{O}$  в формирующейся послойно наледи по формуле Рэлей. Промерзание воды сопровождается изотопным фракционированием, в результате первые 60-65% образующегося льда изотопно тяжелее воды на  $1,8-2,8\text{‰}$  по значениям  $\delta^{18}\text{O}$ .<sup>[39,41]</sup> При этом происходит облегчение изотопного состава по кислороду на  $1,8-2,8\text{‰}$  остающейся воды при равновесных условиях; выше скорость промерзания, тем ниже коэффициент фракционирования и тем меньше разница в изотопном составе между водой и льдом.

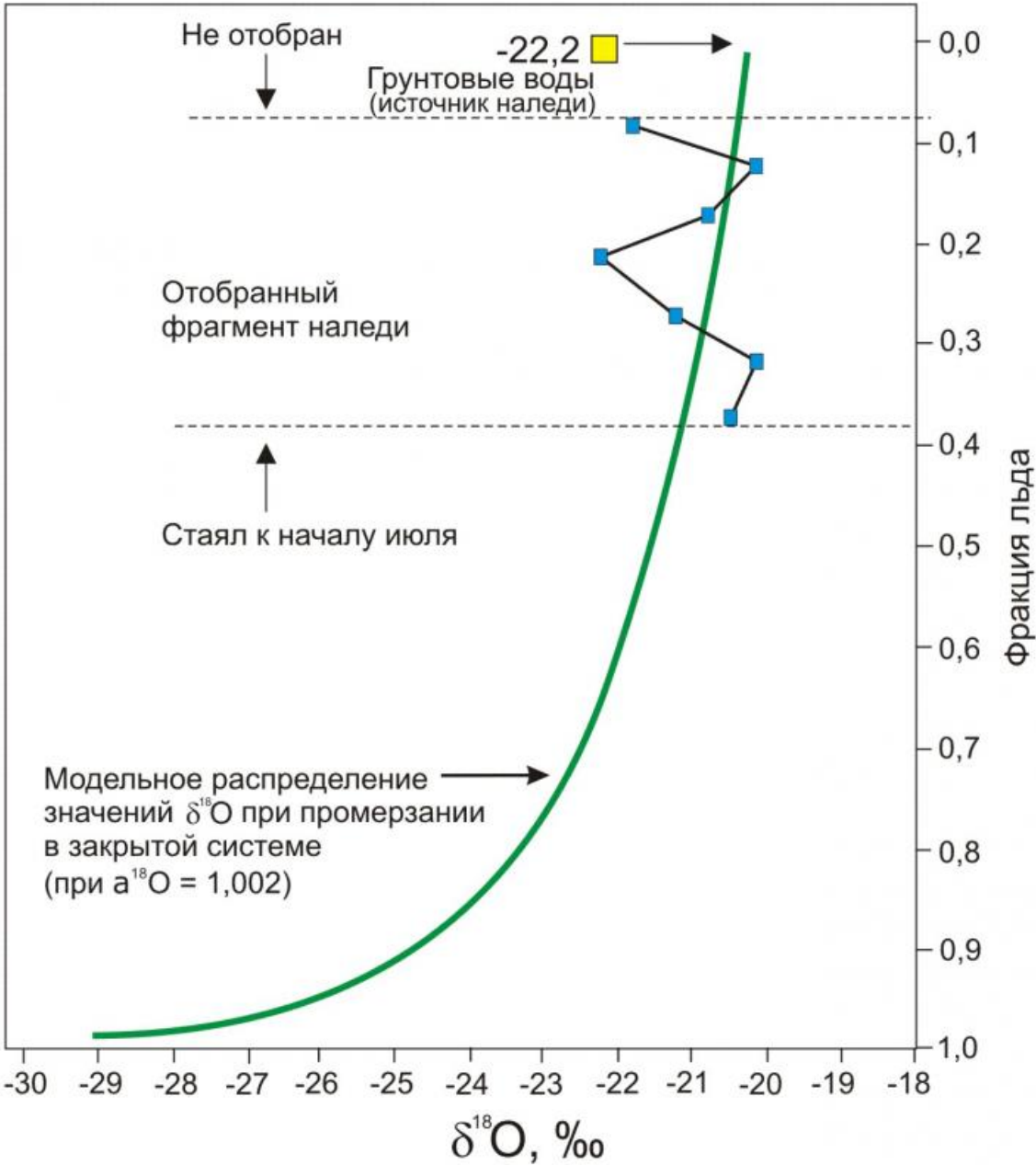


Рис. 8. Распределение значений  $\delta^{18}\text{O}$  в фрагменте наледи Булуус и рассчитанное по формуле Рэля теоретическое распределение значений  $\delta^{18}\text{O}$  во льду при последовательном промерзании первоначального объёма излившейся воды (зеленая линия)

Самый нижний слой наледи (предположительно 20 см), скорее всего, представляют собой лед воды р.Булуус, расположенные выше слои уже скорее всего образовались при излиянии на поверхность и замерзания грунтовых вод. В исследуемом фрагменте наледи нами, скорее всего, опробован лед последовательно формировавшихся фракций (слоев) от 0,09 до 0,38 (табл. 4, рис. 8).

Таблица 4. Распределение изотопных значений ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ,  $d_{\text{exc}}$ ) во фракциях льда исследованного фрагмента наледи

| Глубина от поверхности, см | Предполагаемая фракция льда | $\delta^{18}\text{O}$ , ‰ | $\delta^2\text{H}$ , ‰ | $d_{\text{exc}}$ , ‰ |
|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|
| 0-10                       | 0.38                        | -20.4                     | -161.1                 | 2.1                  |

| Глубина, м | Фракция льда, % | $\delta^{18}\text{O}$ , ‰ | $\delta^{2}\text{H}$ , ‰ | $d_{\text{ex}}$ , ‰ |
|------------|-----------------|---------------------------|--------------------------|---------------------|
| 10-20      | 0,33            | -20,1                     | -159,5                   | 1,3                 |
| 20-30      | 0,28            | -21,2                     | -166,6                   | 3,0                 |
| 30-40      | 0,23            | -22,2                     | -173,7                   | 3,9                 |
| 40-50      | 0,18            | -20,8                     | -164,9                   | 1,5                 |
| 50-60      | 0,13            | -20,2                     | -160,9                   | 0,7                 |
| 60-70      | 0,09            | -21,9                     | -170,7                   | 4,5                 |

Первые фракции льда (если считать источником воды грунтовые воды со значением  $\delta^{18}\text{O} = -22,2\text{‰}$ , см. табл. 3) теоретически могли характеризоваться значением  $\delta^{18}\text{O} = -20,2\text{‰}$ , если коэффициент фракционирования  $\alpha^{18}\text{O} = 1,002$  (некоторое среднее значение при осредненной скорости промерзания воды). Следующие порции льда, намерзающие снизу-вверх должны характеризоваться постепенным снижением значений изотопного состава, т.к. остающаяся вода также постепенно изотопно обедняется. Идеальное (модельное) распределение изотопного состава льда при промерзании объема воды (со значением  $\delta^{18}\text{O} = -22,2\text{‰}$ ) имеет вид плавной кривой со значениями для образующегося льда от  $-20,2$  до  $-29\text{‰}$  (см. рис. 8).

Реальное распределение изотопного состава фрагмента наледи отличается от модельного пилообразной формой (см. рис. 8), хотя в целом тенденция снижения изотопного состава по мере нарастания наледи (от фракции льда 0,09 до 0,38) прослеживается. Такой пилообразный характер изотопной кривой может объясняться тем, что на поверхность наледи периодически выпадает изотопно легкий снег и грунтовые воды, смешиваясь со снегом, формируют слои льда с более низким изотопным составом (отрицательные пики на изотопной кривой). Более низким значениям  $\delta^{18}\text{O}$  соответствуют более низкие значения  $\delta^2\text{H}$  и более высокие значения  $d_{\text{ex}}$  (рис. 9, а-в), что может соответствовать зимним осадкам (зимний снег, как правило, характеризуется более высокими значениями  $d_{\text{ex}}$ ).

Также можно предположить, что промерзанию подвергались несколько водоносных горизонтов, и промерзание каждого из них сопровождалось изливанием воды на поверхность с образованием первых слоев с более тяжелым изотопным составом (положительные пики на изотопной кривой).

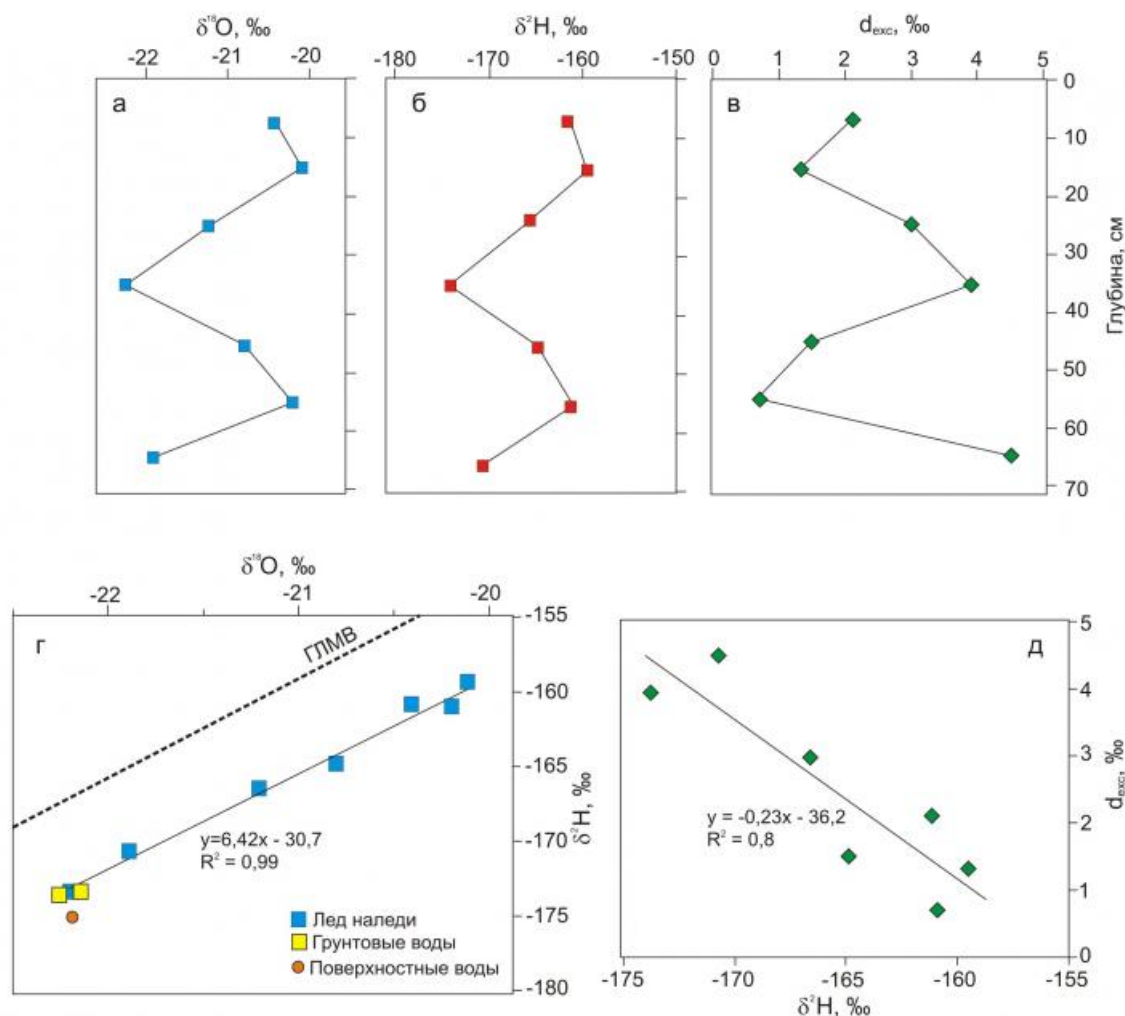


Рис. 9. Распределение значений изотопного состава (а –  $\delta^{18}\text{O}$ , б –  $\delta^2\text{H}$ , в –  $d_{\text{excess}}$ ) по вертикали в наледи Булуус, соотношение  $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$  во льду наледи и грунтовых и поверхностных водах (г) и  $d_{\text{excess}}$ - $\delta^2\text{H}$  (д) во льду

В любом случае, значения изотопного состава во вскрытом фрагменте наледи не противоречат теории промерзания жидкой воды в равновесных условиях, т.к. линия соотношения  $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$  имеет наклон 6,4 (рис. 9, г), что находится в диапазоне 6,2-7,3 для теоретически рассчитанных наклонов соотношений  $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$  для идеального релеевского фракционирования при переходе воды в лед; также соотношение  $d_{\text{excess}}$ - $\delta^2\text{H}$  имеет отрицательное значение наклона = -0,23 (рис. 9, д), что может указывать на промерзание жидкой воды (не атмосферных осадков, для которых корреляция между  $d_{\text{excess}}$ - $\delta^2\text{H}$  отсутствует). Это значение близко к теоретически рассчитанному Д. Ласселем [39] наклону  $d_{\text{excess}}$ - $\delta^2\text{H} \approx -0,25$  для льда, формировавшегося в равновесных условиях промерзания.

Ранее авторами было проведено исследование изотопного состава 3-х наледей в долине р.Вилуй. [10] Сравнение соотношения величин  $\delta^2\text{H}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  наледных льдов Булуус (рис. 10, а) и трёх наледей на реке Вилуй (рис. 10, б) показало сходство ко-изотопных уравнений, коэффициенты соотношения составляют 6,7 для наледного льда Булуус и 6,0, 5,3 и 5,1 для трёх наледей на реке Вилуй. Это демонстрирует, что механизм формирования наледей сходен. Также можно отметить, что изотопный состав наледных

льдов на реке Вилюй также варьирует в очень узком диапазоне: значения  $\delta^{18}\text{O}$  изменяются в диапазоне от 1,6 до 1,9‰, значения  $\delta^2\text{H}$  – от 6,4 до 19,9‰.

Однако значения изотопного состава грунтовых вод – источников воды для вилюйских наледей – более контрастные: для двух вилюйских наледей (№№2 и 3) изотопный состав воды источника расположен внутри диапазона значений по наледи, для вилюйской наледи №1 вода источника более изотопно легкая (как в случае с наледью Булуус и ее источником). Такое различие может говорить о том, что наледи 2 и 3 формировались скорее в условиях более закрытой системы, когда сначала происходит утяжеление изотопного состава льда, а потом его постепенное облегчение. Для наледи 1 такие условия в полной мере не были реализованы, т.к. отмечено утяжеление изотопного состава льда снизу-вверх.

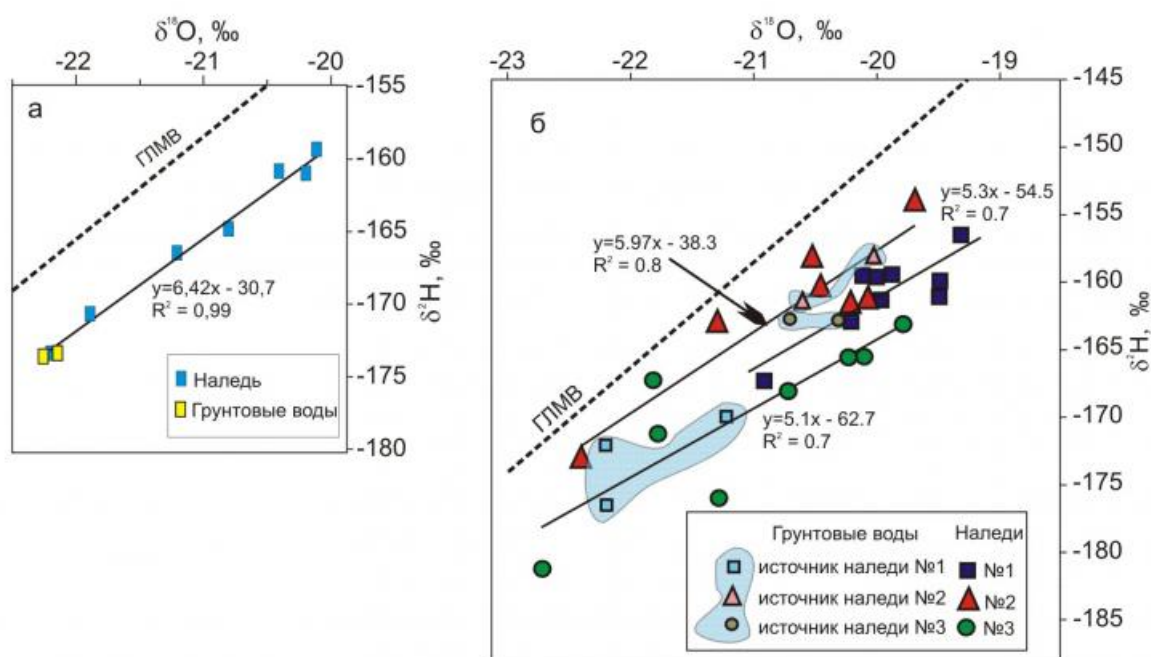


Рис. 10. Диаграммы соотношения величин  $\delta^2\text{H}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  наледи Булуус (а) и трёх наледей на реке Вилюй (б)

Сравнение соотношения величин  $\delta^2\text{H}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  наледных льдов Булуус (рис.10, а) и трёх наледей на реке Вилюй (рис. 10, б) показало сходство ко-изотопных уравнений, коэффициенты соотношения составляют 6,7 для наледного льда Булуус и 6,0, 5,3 и 5,1 для трёх наледей на реке Вилюй. Это демонстрирует, что механизм формирования наледей сходен. При промерзании в закрытой системе наледей может происходить изотопное фракционирование, при послойном процессе роста наледей снизу вверх. Промерзание воды может сопровождаться образованием льда, который тяжелее воды источника на 1,8-2,8‰. При этом происходит облегчение изотопного состава по кислороду на 1,8-2,8‰ остающейся воды при равновесных условиях, более быстрое промерзание, обычно, существенно снижает фракционирование; Нижние слои наледи сформировались из грунтовых вод – величина  $\delta^{18}\text{O}$  льда в придонной части наледи Булуус на глубине 0,4-0,7 м составляет ниже  $-22\text{‰}$ . В слоях льда, залегающих выше величина  $\delta^{18}\text{O}$  колеблется от  $-21,2\text{‰}$  до  $-22,2\text{‰}$ , что возможно отражает некоторое участие изотопически более легкого снега.

## Выводы



Исследование изотопного состава наледных льдов позволило установить, что:

- изученный фрагмент наледи Улахан-Тарын является нижней частью наледи. Как уже сказано, наледь достигает мощности 3 м в конце зимы, на момент исследования (начало июля) мощность наледи составляла 115 см;
- Изотопный состав наледи Булуус мало варьирует: значения  $\delta^{18}\text{O}$  изменяются от  $-20,2$  до  $-21,9\text{‰}$ , величины  $\delta^2\text{H}$  варьируют от  $-159,5$  до  $-173,7\text{‰}$ . Наледный лёд в целом изотопически немного более "тяжёлый" по сравнению с поверхностными водами ручья Улахан-Тарын, значения  $\delta^{18}\text{O}$  составляют  $-22,18\text{‰}$ , а величина  $\delta^2\text{H}$  –  $-175,1\text{‰}$ . Грунтовые воды изотопически близки к водам ручья они также изотопически более "легкие" по сравнению с наледным льдом, в них значения  $\delta^{18}\text{O}$  изменяются от  $-22,17$  до  $-22,25\text{‰}$ , величины  $\delta^2\text{H}$  варьируют от  $-173,7$  до  $-175,1\text{‰}$ ;
- При промерзании наледей в закрытой системе может происходить изотопное фракционирование, при послойном процессе роста наледей снизу вверх. Промерзание воды может сопровождаться образованием льда, который тяжелее воды источника на  $1,8\text{--}2,8\text{‰}$ . При этом происходит облегчение изотопного состава по кислороду на  $1,8\text{--}2,8\text{‰}$  остающейся воды при равновесных условиях, обычно, более быстрое промерзание существенно снижает фракционирование;
- Нижние слои наледи сформировались из грунтовых вод – величина  $\delta^{18}\text{O}$  льда в придонной части наледи Булуус на глубине  $0,4\text{--}0,7$  м составляет ниже  $-22\text{‰}$ . В слоях льда, залегающих выше величина  $\delta^{18}\text{O}$  колеблется от  $-21,2\text{‰}$  до  $-22,2\text{‰}$ , что возможно отражает некоторое участие изотопически более легкого снега.

## Библиография

1. Алексеев В. Р. *Наледи* / Отв. ред. В. В. Воробьев. Новосибирск: Наука: Сиб. отделение, 1987.
2. Алексеев В. Р. *Ландшафтная индикация наледных явлений*. Институт географии СО РАН; отв. ред. В. А. Снытко. Новосибирск: Наука, 2005.
3. Алексеев В.Р., Савко Н.Ф. *Теория наледных процессов (инженерно-географические аспекты)*. М.: Наука, 1975. 204 с.
4. Алексеев В.Р. Многолетняя изменчивость родниковых наледей-тарынов // *Лёд и Снег*. 2016. Т. 56. №1. С. 73–92. doi:10.15356/2076-6734-2016-1-73-92
5. Анисимова Н.П. Некоторые особенности формирования химического состава озерного и наледного льда в Центральной Якутии // *Наледи Сибири*. М.: Наука, 1969. С. 183–190.
6. *Атлас Якутской АССР* / Ред. Т.Д. Сивцев и др. М.: ГУГК СССР, 1981. 41 с.
7. Баишев Н.Е., Шепелёв В.В., Гагарин Л.А. О закономерностях распространения наледей на федеральной автодороге А-360 «Лена» по данным мультиспектральных космических снимков // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2021. Т. 26. №1. С. 60–69. doi: 10.31242/2618-9712-2021-26-1-6
8. Богомолов Н.С., Скларовская А.Н. О взрывах гидролакколитов в южной части Читинской области // *Наледи Сибири*. М.: Наука, 1969. С. 127–130.
9. Бойцов А.В. *Условия формирования и режим подземных вод надмерзлотного и межмерзлотного стока в Центральной Якутии* / Автореф. дис. канд. геол.-минерал. наук. Якутск: Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2002. 23 с.
10. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Гинзбург А.П., Васильчук А.К. Стабильные изотопы кислорода и водорода в наледях долины реки Вилюй // *Арктика и Антарктика*. 2022.

- № 1. С. 1–37. doi: 10.7256/2453-8922.2022.1.37931
11. *Восточная Сибирь* // Гидрография СССР. Гл. 23 / Соколов А.А. 1954.
12. Гагарин Л.А. *Динамика термосуффузионных процессов в криолитозоне (на примере Центральной Якутии)* / Дис. канд. геол.-минерал. наук. Якутск: Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2013. 141 с.
13. Гагарин Л.А., Оленченко В.В., Павлова Н.А. О причинах затухания термосуффузионных процессов на Бестяхской террасе р. Лены в Центральной Якутии // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2023. №5. С. 28–42. doi: 10.31857/S0869780923040045
14. Гагарин Л.А., Бажин К.И., Оленченко В.В., Огонеров В.В., Ву Цинбай. Выявление участков потенциального термосуффузионного разуплотнения грунтов вдоль федеральной автодороги А-360 «Лена» в Центральной Якутии // *Криосфера Земли*, 2019. Т. XXIII. №3. С. 61–68. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-3(61-68).
15. Десяткин Р.В. *Почвообразование в термокарстовых котловинах – аласах криолитозоны* / Автореф. дис. докт. биол. наук. Улан-Удэ, 2006. 48 с.
16. Десяткин Р.В. Аласные экосистемы – основа развития скотоводства в суровых природно-климатических условиях Якутии // *Наука и техника в Якутии*. 2021. №2(41). С. 13–18.
17. Зайцев А.А., Кирик О.М., Михайлов В.С. Взаимодействие речного льда с руслом на р. Лене и её притоках // *Эрозия почв и русловые процессы*. Вып. 16. М.: МГУ. 2008. С. 242–262.
18. Камалетдинов В.А., Минюк П.С. Строение и характеристика отложений Бестяхской террасы средней Лены // *Бюлл. комис. по изуч. четв. периода*, №60. 1991. С. 68–78.
19. *Летопись погоды в Покровске (Якутия)* [Электронный ресурс]. Электронная база данных «Погода и климат». URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/24856.htm>
20. *Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия)* / Гл. ред. М.Н. Железняк; Якутск: Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2018.
21. Мурзин А.Ю. Наледи Якутии // *Наука и техника в Якутии*. 2006. №2 (11). С. 100–104.
22. Оленченко В.В., Гагарин Л.А., Христофоров И.И., Колесников А.Б., Ефремов В.С. Строение участка развития термосуффузионных процессов в пределах Бестяхской террасы реки Лены по геофизическим данным // *Криосфера Земли*. 2017. Т. XXI. №5. С. 16–26. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-5(16-26)
23. Паламарчук В.А., Лебедева Л.С., Павлова Н.А., Хайруллин Р.Р., Баишев Н.Е. Современное состояние источников подземных вод песчаного массива Махатта, Восточная Сибирь // *Криосфера Земли*. 2023. Т. XXVII. №4. С. 24–36. DOI: 10.15372/KZ20230403.
24. Петров В.Г. *Наледи на Амурско-Якутской магистрали*. Л.: Изд-во АН СССР, 1930. 177 с.
25. Правкин С.А., Большинов Д.Ю., Поморцев О.А., Савельева Л.А., Молодьков А.Н., Григорьев М.Н., Арсланов Х.А. Рельеф, строение и возраст четвертичных отложений долины р. Лены в Якутской излучине // *Вестн. СПбГУ. Науки о Земле*. 2018. Т. 63. Вып. 2. С. 209–228. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2018.206>
26. *Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 17. Ленско-Индигирский район*. Вып. 4. Бассейн р. Лены от устья р. Алдан до устья р. Вилюй и бассейн р. Вилюй / Ред. А.С. Шароглазов. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 128 с.
27. Саввинов Д.Д., Прокопьев Н.П., Федоров В.В., Горохов А.Н., Дмитриев А.И., Пестерев А.П., Гаврильева Л.Д., Поисеева С.И., Архипов В.В., Аверенский А.И., Ларионов А.Г., Босиков Н.П., Килибаева О.Н., Габышева П.Е. *Экология аласных*

экосистем. Якутск, 2002. 68 с.

28. Спектор В.В., Спектор В.Б., Боевский Г.Г., Белолуцкий И.Н., Бакулина Н.Т. Перигляциальный аллювий центрально-якутской равнины по данным изучения опорного обнажения Песчаная гора // *Вестн. ЗабГУ*. 2017. Т. 23. №5. С. 45–59. DOI: 10.21209/2227924520172354559.
29. Чевычелов А.П. Мерзлотные почвы Центральной Якутии: география, генезис и разнообразие // *Материалы VII Международной научной конференции, посвященной 90-летию кафедры почвоведения и экологии почв ТГУ «Отражение био-, гео-, антропогенных взаимодействий в почвах и почвенном покрове»* (Томск, 14–19 сентября 2020 г.). Издательский дом ТГУ, 2020. С. 98–101.
30. Чевычелов А.П., Алексеев А.А., Кузнецова Л.И. Магнитная восприимчивость мерзлотных почв лесной катены Центральной Якутии // *Сибирский лесной журнал*. 2021. №2. С. 32– 42. DOI: 10.15372/SJFS20210203.
31. Шепелев В.В. К вопросу о классификации наледей // *Вопросы гидрогеологии криолитозоны*. Якутск, 1975. С. 107–118.
32. Brombierstäudl D., Schmidt S., Nüsser M. Spatial and temporal dynamics of aufeis in the Tso Moriri basin, eastern Ladakh, India // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2023. Vol. 34. Iss. 1. P. 81–93. DOI:10.1002/ppp.2173.
33. Chalov S., Prokopenko K., Magritsky D., Grigoriev V., Fingert E., Habel M., Juhls B., Morgenstern A., Overduin P.P., Kasimov N. Climate change impacts on streamflow, sediment load and carbon fluxes in the Lena river delta // *Ecological Indicators*. 2023. Vol. 157. 111252. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.111252
34. Chesnokova A., Baraër M., Bouchard É. Proglacial icings as records of winter hydrological processes // *The Cryosphere*. 2020. Vol. 14. P. 4145–4164. DOI: 10.5194/tc-14-4145-2020
35. Chevychelov A.P., Skrybykina V.P., Vasil'eva T.I. Geographic and genetic specificity of permafrost-affected soils in central Yakutia // *Eurasian Soil Science*. 2009. Vol. 42(6). P. 600–608. DOI: 10.1134/S1064229309060039.
36. Crites H., Steve V. Kokelj S.V., Lacelle D. Icings and groundwater conditions in permafrost catchments of northwestern Canada. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. 3283. DOI:10.1038/s41598-020-60322-w 1.
37. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // *Tellus*. 1964. Vol. 16. N4. P.436–468. DOI: 10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x
38. Ensom T., Makarieva O., Morse P., Kane D., Alekseev V., Marsh P. (2020). The distribution and dynamics of aufeis in permafrost regions. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2020. Vol. 31. Iss. 3. P. 383–395. DOI:10.1002/ppp.2051.
39. Lacelle D. On the  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  and d-excess relations in meteoric precipitation and during equilibrium freezing: theoretical approach and field examples // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2011. Vol. 22. N1. P. 13–25.
40. Lainis A., Neupauer R.M., Koch J.C., Gooseff M. Seasonal and decadal subsurface thaw dynamics of an Aufeis feature investigated through numerical simulations // *Hydrological Processes*. 2024. Vol. 38. Iss. 3. e15106. DOI: 10.1002/hyp.15106.
41. Michel F.A. Isotope characterisation of ground ice in northern Canada // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2011. Vol. 22. N1. P. 3–12.
42. MacDonald A. M., Black A. R., Dochartaigh B. É. Ó , Everest J., Darling W. G., Flett V. D. Peach W. Using stable isotopes and continuous meltwater river monitoring to investigate the hydrology of a rapidly retreating Icelandic outlet glacier // *Annals of*

- Glaciology*. 2016. Vol. 57(72). P. 151–158. DOI: 10.1017/aog.2016.22.
43. Olenchenko V., Zemlianskova A., Makarieva O., Potapov V. Geocryological Structure of a Giant Spring Aufeis Glade at the Anmangynda River (Northeastern Russia) // *Geosciences*. 2023. Vol. 13. 328. DOI: 10.3390/geosciences13110328.
44. Wohl E., Scamardo J. E. (2022). Aufeis as a major forcing mechanism for channel avulsion and implications of warming climate // *Geophysical Research Letters*. 2022. Vol. 49. e2022GL100246. DOI:10.1029/2022GL100246.
45. Yoshikawa, K., Hinzman L. D., Kane D. L. Spring and aufeis (icing) hydrology in Brooks Range, Alaska // *J. Geophys. Res.*, 2007. Vol. 112. G04S43. DOI: 10.1029/2006JG000294.

## Результаты процедуры рецензирования статьи

*В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.*

*Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).*

Предмет исследования являются, по мнению автора, результаты изучения морфология наледи, условия ее залегания и распределение стабильных изотопов кислорода и водорода в нижней ее части в районе южной границы Бестяхской террасы на правом берегу р. Лены в рамках территории двух ключевых участков: ручей Улахан-Тарын и наледь Булуус .

Методология исследования, в статье указаны как анализ параметров измерения образцов, полученных в результате полевых исследований. Наледный лед, изученный на ключевом участке был отобран из вертикального обнажения, вскрытого в результате естественного бокового оттаивания наледного льда при помощи стальной коронки диаметром 5,1 см, приводимой в движение электрической дрелью Bosch. В лабораторных условиях измерения изотопного состава кислорода и водорода льда выполнены на лазерном инфракрасном спектрометре Picarro L 2130-i в Ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парке Санкт-Петербургского государственного университета. Использованы следующие международные стандарты: V-SMOW-2, GISP, SLAP, USGS-45 и USGS-46.

Из анализа статьи можно сделать вывод об использовании авторами статьи метода анализа полученных данных, их обобщение и построение графиков распределения изотопов в наледи, а также статистические методы исследования с выявлением коэффициента корреляции, распределение значений изотопного состава по вертикали.

Актуальность затронутой темы безусловна и состоит в том, что наледи являются одним из наиболее опасных природных явлений. Отрицательное воздействие наледей определяется неожиданным затоплением территории и последующим замерзанием воды, формированием ледяных преград, обледенением подземных сооружений и коммуникаций (шахт, штолен, туннелей, водопропускных и канализационных колодцев), а также обледенением автомобильных и железных дорог, береговых гидротехнических сооружений и др. Получении информации о их распределении является важной составляющей природно-климатических и хозяйственных особенностей холодных регионов, так как снег важен для экологической и климатической систем. В связи с этим необходима регистрация фактических характеристик во времени и в пространстве, т.е. мониторинг режима снегового питания в частности и гидрологического режима в целом в зависимости от условий формирования, депонирования и таяния. Это является важным аспектом понимания геоэкологического механизма гидрологических процессов.

Научная новизна заключается в попытке автора статьи на основе проведенных

исследований при промерзании наледей в закрытой системе может происходить изотопное фракционирование, при послойном процессе роста наледей снизу вверх. Автор отмечает, что фактические значения, полученные в промерзание воды может сопровождаться образованием льда, который тяжелее воды источника, при этом приходит облегчением изотопного состава по кислороду остающейся воды при равновесных условиях, обычно, более быстрое промерзание существенно снижает фракционирование. Это является важным дополнением в развитии понимания динамики водных ресурсов.

Стиль, структура, содержание стиль изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, отражающим результаты измерения. Статья иллюстрирована визуализированными формами фотографии, графиков и таблиц. Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, но не содержит ссылки на нормативно-правовые акты и методические рекомендации по статистическому анализу данных.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся информации, полученной автором в результате анализа.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения, позволившие применить полученные результаты. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.