

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) СНЕЖНОГО ПОКРОВА ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ

© 2025 г. Н. Ю. Факашук^{1,*}, О. Л. Опокина¹, А. В. Хомутов¹, Ю. А. Дворников^{2,3}

¹Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН, Тюмень, Россия

²Научный центр “Смарт-технологии устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений”, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

³Лаборатория карбомониторинга наземных экосистем, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия

*e-mail: n.yu.fakashchuk@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.03.2025 г.

После доработки 24.05.2025 г.

Принята к публикации 26.06.2025 г.

Исследован изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) снежного покрова на полуострове Ямал. Средние значения изотопного состава: $\delta^{18}\text{O} = -20.207 \pm 3.3\text{‰}$ и $\delta\text{D} = -152.677 \pm 23.8\text{‰}$. Изотопный состав снежного покрова на полуострове имеет зависимость от высоты и плотности. Содержание $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в ямальском снеге растёт с глубиной. Изотопный состав снега, залегающего на поверхности озёр, тяжелее, чем на субстрате.

Ключевые слова: изотопный состав, снежный покров, полуостров Ямал, тундра

DOI: 10.7868/S2412376525030087

ВВЕДЕНИЕ

В условиях глобального изменения климата возрастает актуальность исследований, направленных на изучение преобразований естественных характеристик природных ландшафтов. Климатические флуктуации активно затрагивают арктические и субарктические территории, где наблюдаются интенсивные изменения среднегодовых значений температуры воздуха и количества атмосферных осадков (Previdi et al., 2021). Для исследования климатических изменений и их влияния на природные воды активно применяется изотопный метод (Васильчук и др., 2013). Изотопный состав воды меняется при её фракционировании, которое зависит от физических условий окружающей среды. Знание коэффициентов изотопного фракционирования даёт возможность определить условия её формирования. Изотопный метод широко используется для исследования арктических ландшафтов: генезиса подземных льдов (Васильчук, 1992), водного баланса арктических водоёмов (Ala-año et al., 2018; Лепокурова и др., 2023), циркуляции воздушных масс (Папина и др., 2017; Малыгина и др., 2020).

Основным источником питания поверхностных вод тундровых ландшафтов являются талые воды снежного покрова. Формирование изотопного состава снега происходит на этапе формирования снежных кристаллов в атмосфере и после выпадения на земную поверхность. На изотопный состав атмосферных осадков влияют физические процессы внутри воздушной массы, которые зависят от траектории её движения. После выпадения снега на земную поверхность в нём происходят процессы перекристаллизации снежных зёрен, которые также сопровождаются изотопным фракционированием (Котляков, Гордиенко, 1982; Hughes et al., 2021).

Исследованием изотопного состава снежного покрова в России занимались сотрудники МГУ во главе с Ю.К. Васильчуком, изучавшие территории севера Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнин, Забайкальского края (Васильчук и др., 2005; Чижова и др., 2015; Васильчук и др., 2016). Сотрудники Института водных и экологических проблем СО РАН исследовали Алтайский регион, центральную Якутию, Надымский регион (Малыгина и др., 2017; Папина

и др., 2017; Малыгина и др., 2020;). Другие научные группы изучали изотопный состав снега в полярных и приполярных областях России (Kiruta et al., 2005; Лисицын и др., 2017; Бородулина и др., 2021). Целью большинства работ служит накопление современных эмпирических данных, изучение влияния условий окружающей среды (температура воздуха) на формирование изотопных значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, палеореконструкции условий формирования природных вод.

В Российской Арктике много территорий, где изотопный состав снежного покрова не изучен или изучен слабо. Одна из таких территорий — полуостров Ямал. Авторам удалось найти обобщённые данные по содержанию $\delta^{18}\text{O}$ в лежалом снеге в работе Л.Н. Крицук (2010) для полуостровов Ямал и Гыданский, но без какой-либо информации о местоположении точек отбора проб. Также существуют единичные данные по снежнику в районе метеостанции (далее — м.с.) Марре-Сале (Слагода и др., 2012). Таким образом, изучение изотопного состава снежного покрова полуострова актуально и представляет интерес для фундаментальной науки. Цель данного исследования — сбор информации об изотопном составе снежного покрова полуострова Ямал и изучение влияния на него естественных факторов.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Территория Ямала относится к западно-арктическому климатическому району (Криосфера нефтегазоконденсатных..., 2006). Климат суровый: лето короткое и прохладное, зима долгая (до 9.5 месяцев) и малоснежная с частыми метелями (до 140 дней в году). Главная особенность климата — смешанный характер циркуляции атмосферы: летом преобладают воздушные массы, идущие с Атлантического океана, а зимой — с материка на океан. Это приводит к большому разбросу температур и разнообразию направлений ветра. В результате столкновения различных воздушных масс может выпадать относительно большое количество осадков за недолгий период. Имеют место снежные бураны и оледенения береговой зоны (Имшенецкий, 2005).

Изменения климата полуострова сопровождаются волнами потепления и похолодания (1910–1945 гг. — потепление, 1945–1975 гг. — похолодание, с 1975 г. — потепление (Оценочный доклад..., 2008)) и вписываются в глобальную тенденцию потепления атмосферы, но

изменение температуры приземного слоя воздуха происходит в различных регионах по-разному. В связи с глобальными изменениями климата прогнозируется значительное увеличение среднегодовой температуры ($0.3\text{--}0.4^\circ\text{C}$ за десятилетие) и годового количества осадков на $50\text{--}100$ мм за тот же период (Сампсонов, 2010). Согласно метеоданным, на территории полуострова Ямал (Бабкина и др., 2019) есть тенденция к увеличению среднегодовой температуры воздуха и количества атмосферных осадков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сотрудниками ИКЗ ТюмНЦ СО РАН совершены два экспедиционных выезда на территорию полуострова Ямал в конце марта — начале апреля в 2017 и 2019 гг. В первой экспедиции отобрано 42 пробы снега для изотопного анализа в 24 точках по меридиональной трансекте через полуостров и в районе научного геокриологического стационара (н.с.) “Васькины Дачи”. Карта-схема района работ 2017 г. представлена на рис. 1. В районе н.с. пробы снежного покрова отбирались в характерных точках рельефа и на озёрном льду. Для отслеживания различий в изотопном составе внутри снежной толщи отбор проб проводился в двух горизонтах: в верхнем, с округлым зернистым снегом различного размера, и в нижнем горизонте глубинной изморози. В 2019 г. отобрано 18 проб в 11 точках (№ 25–35) с заложением снежного разреза с погоризонтным отбором проб в точке № 29 (см. рис. 1).

Пробы снега отбирались пластиковой лопаткой и упаковывались в zip-пакеты объёмом 2.5 дм^3 . После расплавки снега снежную воду ($\approx 0.6\text{ дм}^3$) переливали в пластиковые флаконы объёмом 10 мл. Охлаждённые пробы анализировались в лаборатории “ЛИКОС” ААНИИ (Санкт-Петербург), где определяли содержание $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ методом масс-спектрометрии по стандарту V-SMOW-2 на анализаторе Picarro.

Статистический анализ данных производился в программном комплексе Statistica 10.0. Корреляционные зависимости были определены с помощью метода Чарльза Спирмена с уровнем достоверности $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обзор авторских данных. Общее количество интегральных значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в расплавах снежного покрова за два года — 35. Статистические параметры значений $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d_{exc}

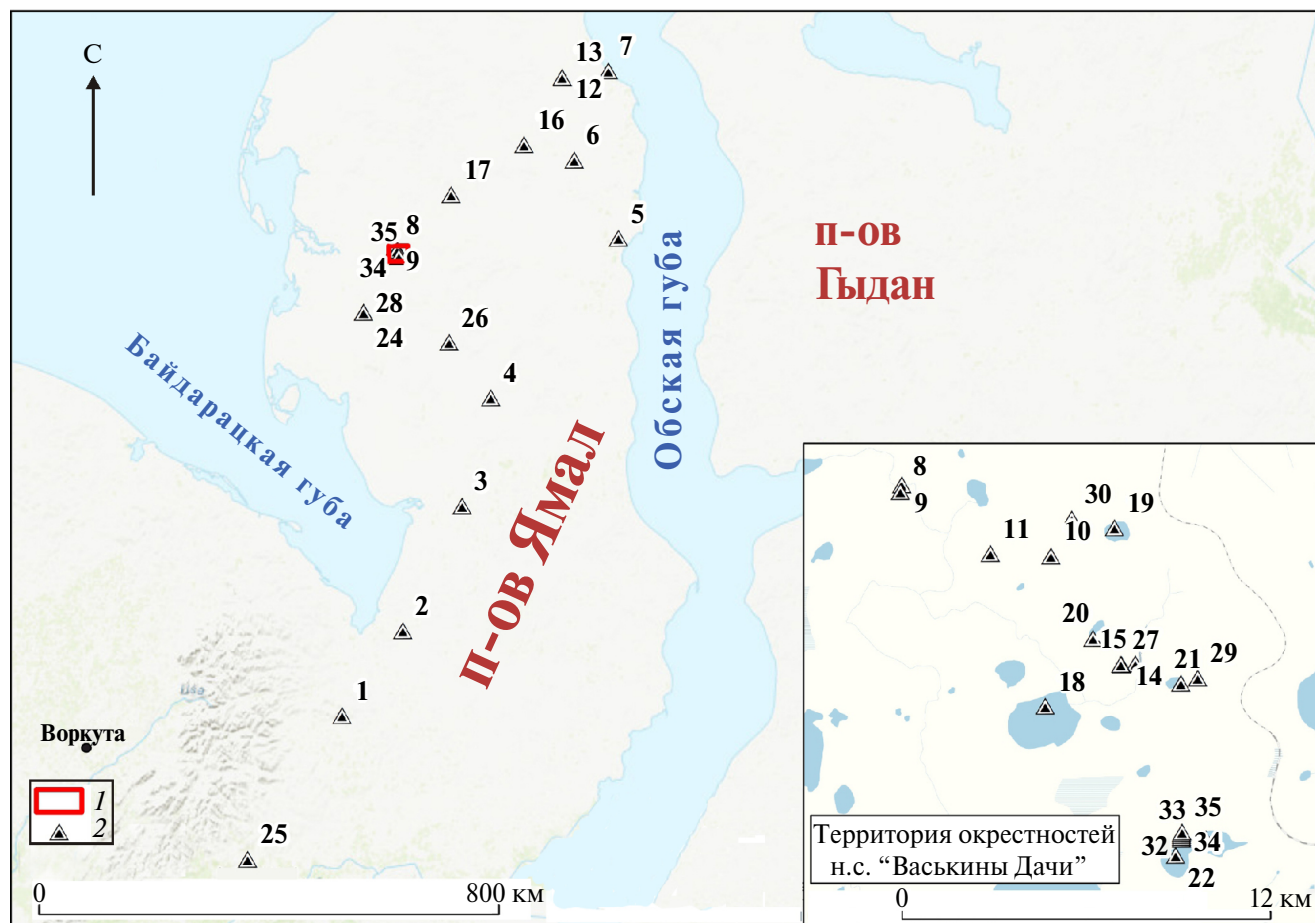


Рис. 1. Карта-схема точек отбора проб снежного покрова. На карте-врезке представлена территория окрестностей научного стационара “Васькины Дачи”. 1 – границы карты-врезки; 2 – точки отбора проб снежного покрова

Fig. 1. Scheme of snow cover sampling points. The inset map shows the area around research station “Vaskiny Dachi”. 1 – boundaries of the inset map; 2 – snow cover sampling points

представлены в табл. 1. Средние значения $\delta^{18}\text{O}$ (-19.87‰) и $\delta^2\text{H}$ (-149.33‰) относительно низкие, что характерно для атмосферных осадков высоких широт благодаря существованию широтного эффекта. При движении воздушных масс к полюсам за счёт конденсации и выпадения осадков происходит обеднение атмосферных паров тяжёлыми изотопами. Максимальные значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ зафиксированы в самой восточной точке № 9 на поверхности термокарстового озера. Минимальный показатель $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ обнаружен в глубоком шурфе (275 см) в пойме притока р. Панзананаяха (точка № 11).

Для оценки протекания процессов метаморфизма (и постдепозиционных процессов) в снежной толще используется дейтериевый эксцесс. Его среднее значение равно 9.6‰ . Минимум (-10.8‰) находится в точке № 9;

максимум в 16.7‰ зафиксирован в точке № 13 на водораздельной поверхности в долине р. Сабетта-Яха.

Полученные значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ выделяются большой амплитудой (размахом) значений в 15‰ для $\delta^{18}\text{O}$, 110‰ для $\delta^2\text{H}$ и 27.5‰ для d_{exc} . Это говорит о том, что изотопный состав осадков и условия его формирования сильно различаются от точки к точке. Особенно это характерно для дейтерия, который имеет высокие значения дисперсии и стандартного отклонения (см. табл. 1). Такая специфика в распределении изотопов связана с широким разнообразием условий снегонакопления в тундровых ландшафтах Ямала, где большая расчленённость рельефа и отсутствует древесная растительность (в отличие от территорий, лежащих южнее), что способствует активному ветровому перераспределению снега.

Таблица 1. Численные характеристики изотопного состава снежного покрова полуострова Ямал за 2017 и 2019 гг.

Параметр	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	d_{exc}	Количество наблюдений
<i>Интегральные пробы за весь период</i>				
Среднее	–19.87	–149.33	9.60	35
Минимум	–27.94	–209.04	–10.78	35
Максимум	–12.09	–98.43	16.71	35
Размах	15.85	110.60	27.49	35
Дисперсия	11.07	565.43	24.98	35
Стандартное отклонение	3.33	23.78	–	35
<i>По горизонтам</i>				
Верхние горизонты	–22.04	–165.22	11.13	18
Нижние горизонты	–19.21	–145.05	8.58	18
Средняя разница между горизонтами	2.83	20.17	2.55	18
<i>На различных подстилающих поверхностях</i>				
Тип поверхности:	Для всего профиля			
Озёрный лёд	–19.82	–151.24	7.30	8
Почвенный покров	–20.74	–155.81	10.11	16
Разница	0.92	4.57	2.81	–
<i>Для нижних горизонтов</i>				
Озёрный лёд	–15.48	–124.78	–0.92	5
Почвенный покров	–20.64	–152.84	12.24	13
Разница	+5.16	+28.06	–13.16	–

Чтобы отследить линейную зависимость между $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, построена локальная линия тренда, представленная на рис. 2. Линейное уравнение соотношения изотопов в снежном покрове имеет вид $\delta^2\text{H} = 7.05\delta^{18}\text{O} - 9.7$. Наклон линии равен 7.05, что характерно для снежных атмосферных осадков этих широт (Васильчук и др., 2005; Чижова, Васильчук, 2017). Это говорит также о метаморфизации снежных кристаллов с преобладанием процессов испарения и сублимации. Такой вывод подтверждает линейное уравнение регрессии для $d_{\text{exc}} - \delta^2\text{H}$, которое имеет вид $d_{\text{exc}} = -0.11\delta^2\text{H} - 6.03$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.25$.

Сравнительная характеристика авторских данных. Выполнен сравнительный анализ изотопного состава снега полуострова Ямал со снегом близлежащих территорий на основе информации из табл. 2. Относительное содержание

изотопов в лежалом снеге в среднем больше, чем в свежес выпавшем: $-24.2 < -19.1$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $-184.5 < -144.4$ для $\delta^2\text{H}$. Такая разница является результатом процессов метаморфизации снега со временем, с преобладанием процессов испарения/сублимации (Friedman et al., 1991). Дейтериевый эксцесс различен для обоих типов снега. Этот параметр зависит от условий образования снежных кристаллов в атмосфере, которые могут значительно меняться в зависимости от погодных условий в момент выпадения и траекторий движения воздушной массы. Внешний вид уравнений линейной регрессии между $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ также различается для лежалого и свежес выпавшего снега. Величина линейного коэффициента в среднем больше в уравнениях регрессии свежес выпавшего снега ($7.7 > 6.9$). В уравнениях регрессии свежес выпавшего снега свободный член положителен (см. табл. 2). Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$

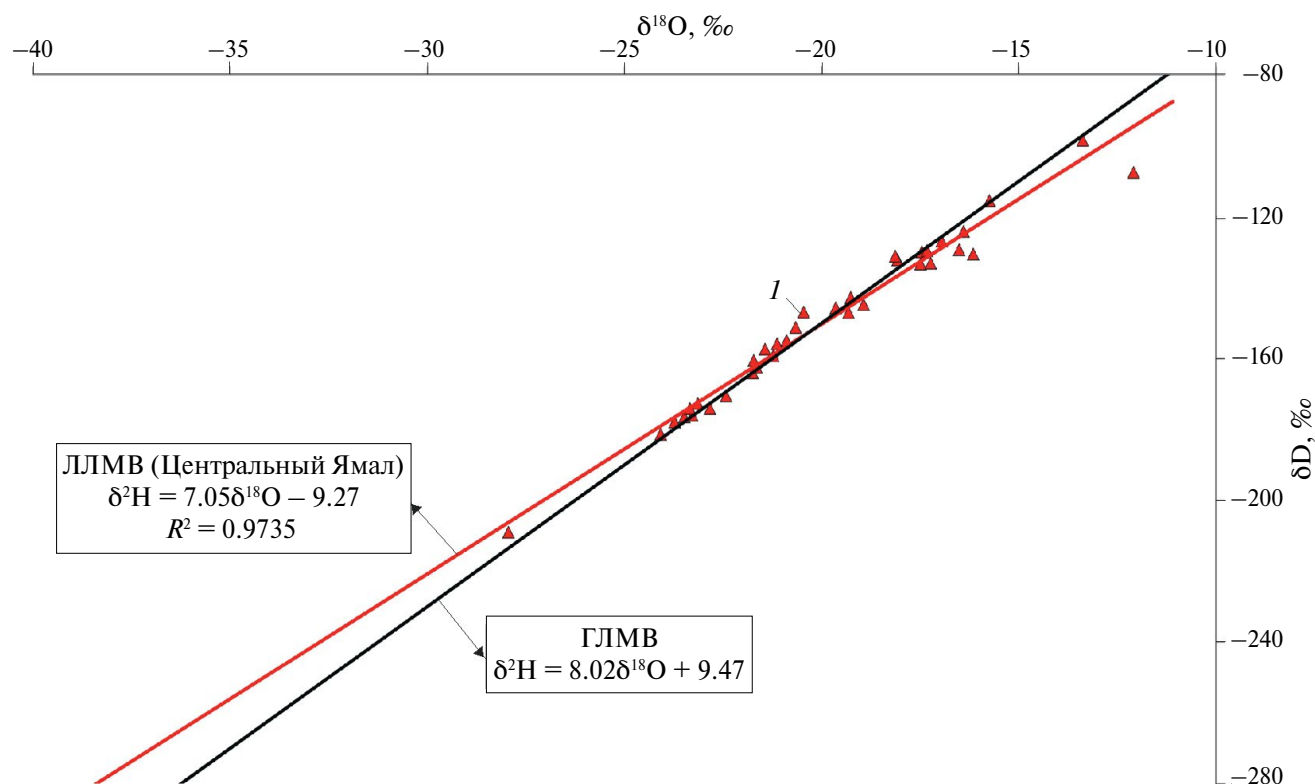


Рис. 2. График соотношения изотопов в снежном покрове полуострова Ямал. Красная линия — авторские данные (локальная линия метеорных вод); чёрная линия — глобальная линия метеорных вод. *I* — значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в точках отбора проб снежного покрова

Fig. 2. Scatterplot of isotope ratio in snow cover of the Yamal Peninsula. Red line — author's data (local line of meteoric waters); black line — global line of meteoric waters. *I* — $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values at snow cover sampling points

лежалого снега выше, чем свежавывавшего из-за происходящих в снежной толще процессов метаморфизма.

Данные метеостанции Салехарда. Была также проанализирована информация об изотопном составе твёрдых атмосферных осадков из базы данных глобальной системы мониторинга — GNIP. На севере Западной Сибири находятся несколько метеорологических станций, ближайшая из которых расположена в г. Салехарде. Атмосферные осадки отбирались один раз в месяц в период наблюдений с 1996 по 2000 г. Для зимних атмосферных осадков в г. Салехарде (на основе базы данных WISER) уравнение линейной регрессии имеет вид $\delta^2\text{H} = 7.81\delta^{18}\text{O} - 0.264$ (см. табл. 2). Распределение средних значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ по месяцам за указанный период представлено на рис. 3.

Имеющиеся среднеемесячные значения расходятся с предполагаемыми значениями $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, полученными путём компьютерного моделирования в программе IsoMAP (www.waterisotopes.org).

Модель использует реальные значения изотопного состава атмосферных осадков со станций мониторинга GNIP и данные об атмосферной циркуляции. По данным моделирования, наименьшие значения изотопов на м/с в Салехарде ожидаются в декабре (см. рис. 3). У изотопных значений с метеостанции такие значения соответствуют январю, который обладает самой низкой средней температурой воздуха (aisori-m.meteo.ru) Такие различия обусловлены: 1) другим периодом сбора данных, используемых в IsoMAP (2000-ые гг.); 2) малым объёмом данных с метеостанции изучаемого региона; 3) несовершенством самой модели. Результаты этого исследования могут быть использованы для уточнения и корректировки прогнозируемых значений в проекте IsoMAP и его аналогах.

Статистический анализ. Корреляционные зависимости между значениями $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ и местоположением точек отбора проб (координаты), а также физическими характеристиками снежного покрова представлены в табл. 3 и на рис. 4.

Таблица 2. Изотопные характеристики снежного покрова близлежащих к исследуемой территорий

Автор	Территория	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	d_{exs} , ‰	Уравнение	Примечание
<i>Свежевыпавший снег</i>						
Чинова и др., 2017	Предгорье Полярного Урала	—	—	—	$\delta^2\text{H} = 7.56\delta^{18}\text{O} + 7.15$	—
GNIP 1996–2000 гг.	Метеостанция в г. Салехарде	–21.9	–172.3	3.5	$\delta^2\text{H} = 7.81\delta^{18}\text{O} - 0.264$	—
Васильчук и др., 2005	Север Восточно-Европейской равнины	–22.8	–169.4	13.3	$\delta^2\text{H} = 7.58\delta^{18}\text{O} + 5.66$	Данные по свежевыпавшему снегу в 9 точках
Васильчук и др., 2016	Тазовский п-ов и южнее	–29.6	–223.8	12.7	$\delta^2\text{H} = 7.76\delta^{18}\text{O} + 5.71$	Частично, данные представлены верхним горизонтом отложенного снега
Малыгина и др., 2021	Надымская низменность в районе местной м.с.	–22.3	–172.6	5.6	$\delta\text{D} = 7.86\delta^{18}\text{O} + 2.4$	Свежевыпавший снег за зиму 2016/17 г.
<i>Лежалый снег</i>						
Чинова и др., 2017	Предгорье Полярного Урала	–27.2... –19.6	–198... –139.7	16.9	—	—
Авторские данные 2017 г.	п-ов Ямал	–19.8	–149.3	9.6	$\delta^2\text{H} = 7.05\delta^{18}\text{O} - 9.7$	18 проб из 35 отобраны в центральной части п-ова
Бородулина и др., 2021	Республика Карелия	–18.5	–139.5	8.7	$\delta^2\text{H} = 6.7\delta^{18}\text{O} - 14.5$	—

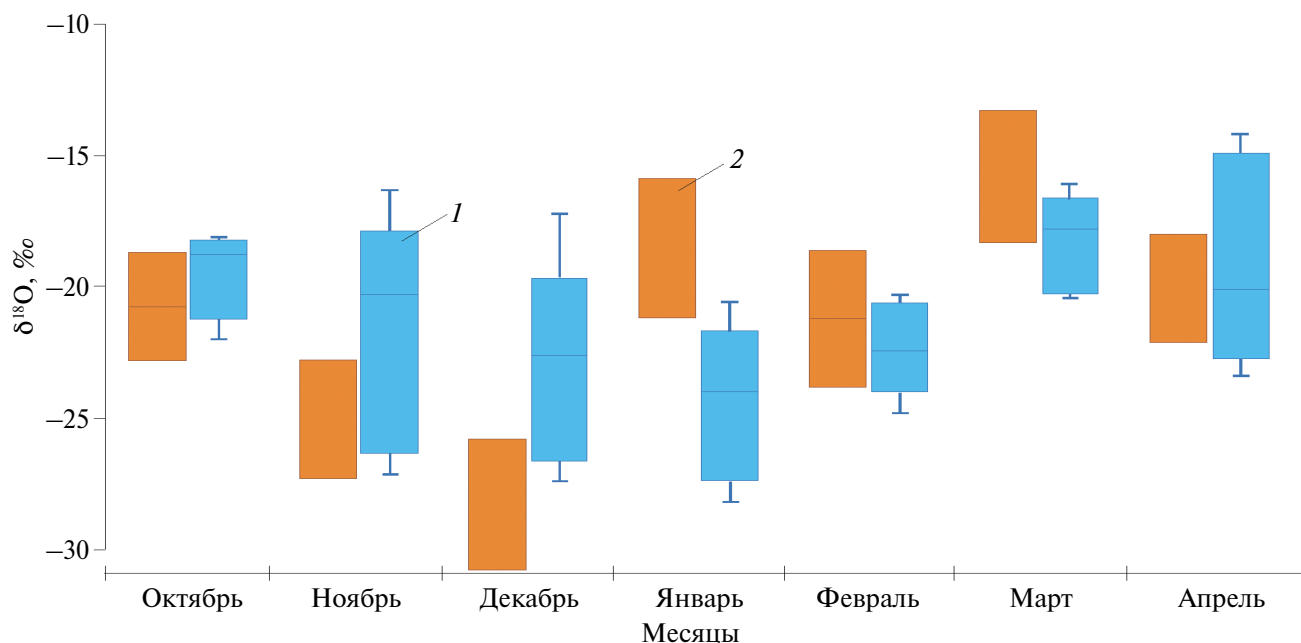
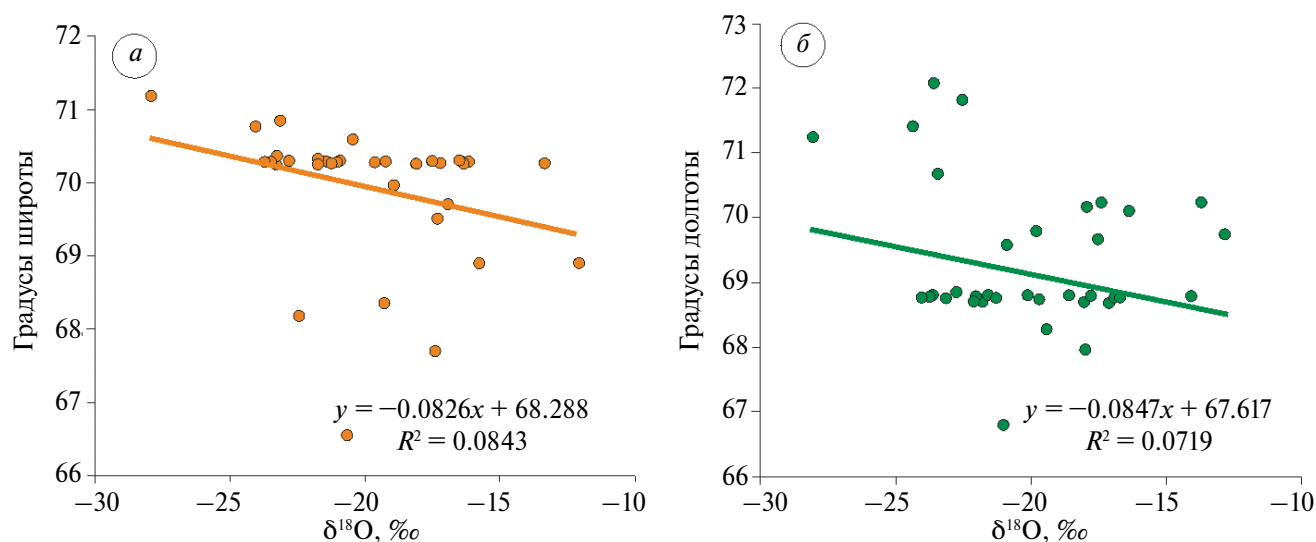
**Рис. 3.** Диаграмма размаха значений $\delta^{18}\text{O}$ по месяцам по данным с метеостанции в г. Салехарде и расчётным данным ISOMap: 1 – данные ISOMap; 2 – данные с метеостанции г. Салехарда**Fig. 3.** Diagram of the range of $\delta^{18}\text{O}$ values by month in Salekhard based on values from the weather station and calculated data from ISOMap: 1 – ISOMap data; 2 – data from weather station in Salekhard

Таблица 3. Значения коэффициентов корреляции между значениями $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в снеге и географическими характеристиками

Параметр корреляции	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	d_{exc}
<i>Авторские данные (35 проб)</i>			
Расстояние до западного побережья	0.07	0.01	−0.28
Расстояние до ближайшего побережья	−0.11	−0.08	0.26
Высота снежного покрова	−0.47*	−0.49	0.29
Плотность снежного покрова	−0.46	−0.51	0.04
<i>Данные сети GNIP г. Салехарда за 1996–2000 гг.</i>			
Количество осадков	0.11	0.18	0.46
Температура воздуха	0.66	0.69	0.23

*Полужирным шрифтом отмечены значимые корреляции.

*Significant correlations are shown in bold.

**Рис. 4.** Графики зависимостей содержания $\delta^{18}\text{O}$ от широты (а) и долготы (б)**Fig. 4.** Scatterplot of the dependence between $\delta^{18}\text{O}$ content and latitude (a) and longitude (b)

Значимых корреляций между относительным содержанием изотопов и местоположением точек отбора проб не обнаружено. Выявлены статистически значимые обратные корреляции между значениями $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ и высотой/плотностью снежного покрова (см. табл. 3). Авторы предполагают, что в точках с меньшей высотой снега интенсивнее происходят процессы перекристаллизации снежных кристаллов, так как здесь отмечены большие значения температурного градиента. Более интенсивные процессы переноса массы обеспечивают образование большей толщины горизонта глубоинной изморози, которая обладает более тяжёлым изотопным составом и меньшей плотностью.

Также по данным с Салехардской метеостанции (1996–2000) выполнен корреляционный анализ между значениями $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ и метеорологическими характеристиками (см. табл. 3). Значимые корреляции получены между содержанием изотопов в снежных осадках и температурой приповерхностного воздуха (66–69%). Подобные зависимости найдены для твёрдых атмосферных осадков других регионов (Васильчук и др., 2006; Екайкин и др., 2007; Steen-Larsen et al., 2013). Корреляция между содержанием изотопов и количеством осадков невелика (около 30%).

Изменение изотопного состава внутри снежной толщи. Нижние горизонты имеют более тяжёлый изотопный состав, чем верхние (см. табл. 1). Это обусловлено процессами снежного метаморфизма, при котором парообразная влага движется от нижних горизонтов к верхним, подчиняясь температурному градиенту (Friedman et al., 1991). Дейтериевый эксцесс больше у верхних горизонтов (см. табл. 1) как результат более интенсивного влагообмена с атмосферой и различий в траекториях воздушных масс с осадками. Средняя разница между горизонтами составила 2.83 для $\delta^{18}\text{O}$ и 20.17 для δD . На основе данных изотопного состава снега на разной глубине составлена диаграмма соотношения изотопов $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ в снежном покрове полуострова Ямал в различных горизонтах (рис. 5).

Различия между частями снежной толщи также отмечаются уравнениями линейной регрессии $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$. Нижние слои имеют меньший наклон линии тренда и отрицательное значение свободного члена. Подобные изменения изотопного состава внутри снежного профиля отмечалось многими исследователями (Sommerfield et al., 1991; Taylor et al., 2001; Ala-aho et al., 2021; Hughes et al., 2021).

В 2019 г. был заложен снежный шурф глубиной 76 см с погоризонтным отбором снега. Шурф располагался в низине, недалеко от термокарстового озера. В шурфе выделено девять горизонтов, в шести из которых отобраны пробы для химических анализов. Геохимические характеристики горизонтов представлены на рис. 6. Распределение $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ внутри снежной толщи по глубине имеет свои отличительные черты.

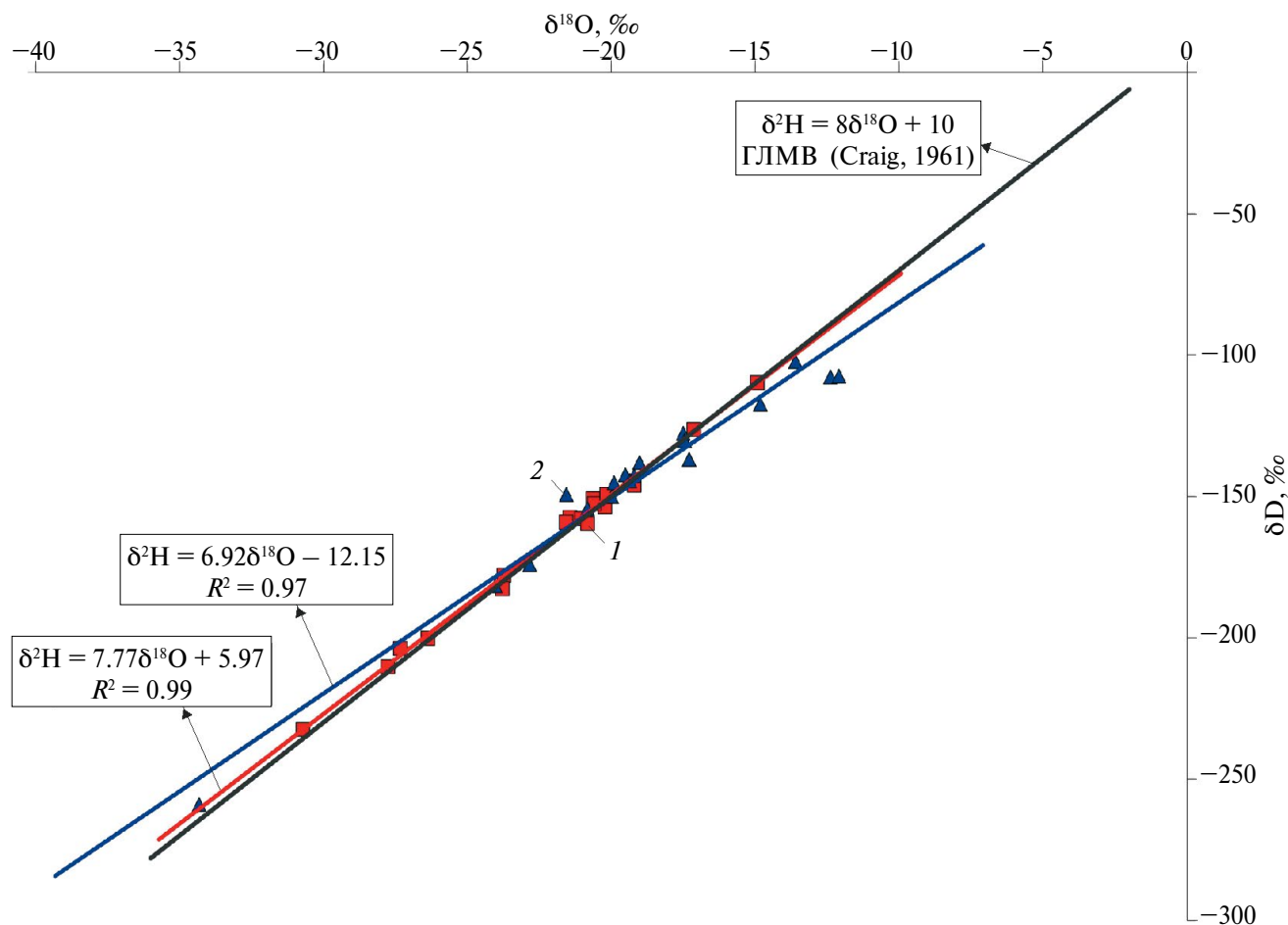


Рис. 5. Соотношения изотопов $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в снежном покрове Ямала в различных горизонтах: 1 – значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в верхнем горизонте в точках отбора проб снежного покрова; 2 – значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в нижнем горизонте в точках отбора проб снежного покрова

Fig. 5. Ratios of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopes in the snow cover of Yamal in different horizons: 1 – Values of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in the upper horizon at snow cover sampling points; 2 – Values of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in the lower horizon at snow cover sampling points

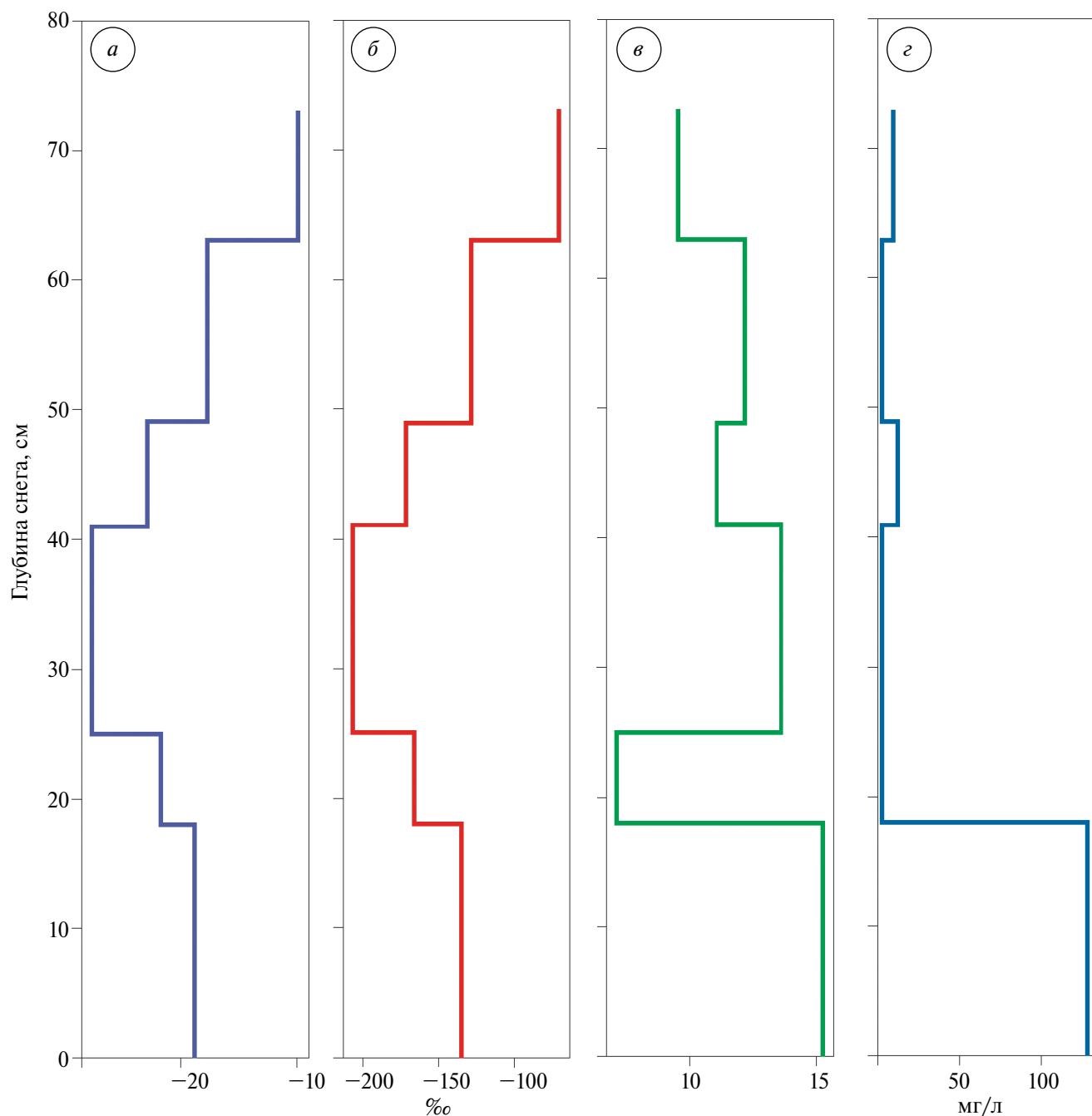


Рис. 6. Изменение геохимических характеристик в снежном шурфе на разной глубине: а – содержание $\delta^{18}\text{O}$ по горизонтам; б – содержание δD по горизонтам; в – содержание дейтериевого эксцесса по горизонтам; г – общая минерализация снежного расплава по горизонтам (мг/л)

Fig. 6. Changes in geochemical characteristics in a snow pit at different depth: а – $\delta^{18}\text{O}$ content by horizons; б – δD content by horizons; в – deuterium excess content by horizons; г – total mineralization of snow melt by horizons (mg/l)

Минимальное содержание $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ обнаружено в горизонте 25–41 см с мелкозернистым снегом и глубинной изморозью в нижней части (см. рис. 6, а–б). Этот горизонт имеет меньшую плотность, чем соседние. Горизонт 25–41 см образовался при более низких температурах, чем

первоначальные горизонты, и имел впоследствии влагообмен с вышележащими слоями, что сделало его изотопный состав наилегчайшим. Дейтериевый эксцесс вдоль профиля изменялся хаотично, и его значения расходятся с авторскими усреднёнными данными по верхним

и нижним горизонтам (см. табл. 1). Два наивысших значения эксцесса характерны для горизонтов с глубинной изморозью (25–41 см; 0–18 см), наименьшее — для разделяющего их горизонта (см. рис. 6, в). Предположительно, период существования данного горизонта как поверхностного был недолгим, а температурный градиент внутри снежной толщи невелик, что обусловило меньшие изменения изотопного состава. Общая минерализация имеет многократное увеличение в самом нижнем горизонте (0–18 см). Этот факт обусловлен заболоченностью подстилающей поверхности (см. рис. 6, г).

Влияние подстилающей поверхности. В связи с тем что часть проб отбиралась на поверхности озёрного льда, проведена проверка предположения о влиянии подстилающей поверхности на формирование изотопного состава снега, в частности нижних горизонтов. Для этого вычислены средние значения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ по профилю и в нижних слоях снега, отобранном с поверхности озера и с остальных точек (см. табл. 1). Как видно из таблицы, существует разница между значениями $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ снежного покрова, расположенного на поверхности льда и почвы. В снеге, залегающем на поверхности льда озера, интегральные значения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ больше, чем на почве на величину 0.92‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и 4.57‰ для $\delta^2\text{H}$. Эта разница становится ещё больше в нижних горизонтах профиля — 5.16‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и 28.06‰ для $\delta^2\text{H}$. Такие результаты обусловлены двумя факторами. Первый фактор — это мощность залегающей снежной толщи, которая в отобранных на озёрах пробах составила в среднем 29.6 см. В остальных точках средняя толщина снега равна 55.2 см. Обратная зависимость между высотой снега и его изотопным составом, как результат снежного метаморфизма, была рассмотрена выше (см. табл. 3). Второй фактор — поступление воды на лёд как результат неравномерного промерзания озёрной поверхности по площади. Такая вода будет иметь более низкие значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, чем свежеснежный снег, а именно, в среднем: –11.5‰ $\delta^{18}\text{O}$ и –92.6‰ $\delta^2\text{H}$ (данные Ю.А. Дворникова по 16 озёрам исследуемой области (октябрь, 2016 г.)). Таким образом, характер подстилающей поверхности оказывает влияние на формирование изотопного состава снежного покрова в тундровых ландшафтах полуострова Ямал.

ВЫВОДЫ

Средние значения изотопного состава снежного покрова полуострова Ямал составляют: $\delta^{18}\text{O} = -20.207 \pm 3.3\text{‰}$ и $\delta\text{D} = -152.677 \pm 23.8\text{‰}$. Уравнение линейной регрессии для снежного покрова имеет вид $\delta^2\text{H} = 6.8\delta^{18}\text{O} - 15.5$. Дейтериевый эксцесс имеет среднее значение в 9.6‰ с размахом 27.5‰.

Изотопный состав свежеснежного и лежалого снега высокоширотных территорий различается. Лежалый снег имеет большие значения $\delta^{18}\text{O}$ ($-24.2 < -19.1$) и $\delta^2\text{H}$ ($-184.5 < -144.4$) и меньшие значения наклона ($7.7 > 6.9$) и свободного члена в уравнении линейной регрессии $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$.

Изотопный состав снежного покрова не зависит от местоположения точек отбора проб на территории полуострова и имеет зависимость от высоты и плотности снежной пачки. Подтверждены зависимости изотопного состава свежеснежного снега от погодных характеристик по данным GNIP с м.с. г. Салехарда за период 1996–2000 гг.

Нижние части снежных профилей ямальского снега имеют более высокие значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, чем верхние. Средняя разница между горизонтами составила 2.83‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и 20.17‰ для $\delta^2\text{H}$. В уравнении линейной регрессии $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ для нижних горизонтов меньшие значения наклона и свободного члена связаны с протеканием процессов метаморфизма в снежной толще.

Изотопный состав снега, залегающего на поверхности озёр, тяжелее, чем на почве, из-за его меньшей высоты и влияния озёрной воды при неравномерном замерзании водной поверхности.

Благодарности. Работа выполнена Институтом криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ–2021–0012). Экспедиции организованы при поддержке НП “МЭЦ Арктика” (2017 г.) и НП “Российский центр освоения Арктики” (2019 г.). Авторы признательны сотрудникам Института криологии Земли Тюменского научного центра СО РАН Е.М. Бабкину и Е.А. Бабкиной за помощь в проведении полевых исследований, а также сотрудникам Лаборатории изменений климата и окружающей среды (ЛИКОС) ААН ИИ за проведение лабораторных анализов. Работа Ю.А. Дворникова выполнена в рамках

Программы стратегического академического лидерства РУДН им. Патриса Лумумбы.

Acknowledgments. The work was carried out by the Earth Cryosphere Institute of the Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. FWRZ–2021–0012). The expeditions were organized with the support of the NC “MEC Arctic” (2014–2017) and the NC “Russian Arctic Development Center” (2018–2019). The authors are grateful to the staff of the Earth Cryosphere Institute of the Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences E.M. Babkina and E.A. Babkina for their assistance in conducting field research, as well as to the staff members of Climate and Environmental Research Laboratory (AARI) for laboratory analytics. Work of Yu.A. Dvornikov is supported by RUDN University Strategic Academic Leadership Programme.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Факашук Н.Ю., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Активизация криогенных процессов на территории Центрального Ямала как следствие региональных и локальных изменений климата и теплового состояния пород // Метеорология и гидрология. 2019. Вып. 44. № 4. С. 283–290.
- Бородулина Г.С., Токарев И.В., Левичев М.А. Изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) снежного покрова Карелии // Лёд и Снег. 2021. Т. 61 № 4. С. 521–532. <https://doi.org/10.31857/S2076673421040105>
- Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций). М.: Изд-во РАН, 1992. Т. 1. 420 с.
- Васильчук Ю.К., Чиждова Ю.Н., Панеш В. Тренд изотопного состава отдельного зимнего снегопада на северо-востоке Европы // Криосфера Земли. 2005. Т. 9. № 3. С. 81–87.
- Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Чиждова Ю.Н. Изотопные методы в географии. Ч. 3: Геохимия стабильных изотопов атмосферы и гидросферы. Учебное пособие / Под ред. Ю.К. Васильчука. М.: Географический факультет МГУ, 2013. 216 с.
- Васильчук Ю.К., Шевченко В.П., Лисицын А.П., Буданцева Н.А., Воробьёв С.Н., Кирпотин С.Н., Крицков И.В., Манасыпов Р.М., Покровский О.С., Чиждова Ю.Н. Изотопно-кислородный и дейтериевый состав снежного покрова Западной Сибири на профиле от Томска до Обской губы // Доклады Академии наук. 2016. Т. 471. № 5. С. 770–775.
- Екайкин А.А. Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии. СПб.: ААНИИ, 2016. 63 с.
- Имшенецкий В.В., Орлов Ю.Н. Технология СПГ – перспективный вариант освоения ресурсов газа п-ова Ямал. М., 2005.
- Котляков В.М., Гордиенко Ф.Г. Изотопная и геохимическая гляциология. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 288 с.
- Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: Т. 1: Криосфера Харасавейского газоконденсатного месторождения / Под общ. ред. Ю.К. Васильчука, Г.В. Крылова, Е. Подборного. Тюмень: ООО “ТюменьНИИгазпрогаз”; СПб.: Недра, 2006. 347 с.
- Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири. М.: Научный мир, 2010. 352 с.
- Лепокурова О.Е., Иванова И.С., Пыряев А.Н. Использование стабильных изотопов водорода, кислорода и углерода при интерпретации условий формирования поверхностных водных объектов Ямало-Ненецкого автономного округа // Изв. Томского политехнич. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 6. С. 7–19.
- Лисицын А.П., Васильчук Ю.К., Шевченко В.П., Буданцева Н.А., Краснова Е.Д., Пантюлин А.Н., Филиппов А.С., Чиждова Ю.Н. Изотопно-кислородный состав воды и снежно-ледяного покрова отделяющихся водоемов на разных стадиях изоляции от Белого моря // Доклады Академии наук. 2013. Т. 449. № 4. С. 467–473.
- Малыгина Н.С., Эйрих А.Н., Курепина Н.Ю., Папина Т.С. Изотопный состав зимних атмосферных осадков и снежного покрова в предгорьях Алтая // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 57–68. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-1-57-68>
- Малыгина Н.С., Эйрих А.Н., Агбалян Е.В., Папина Т.С. Изотопный состав и регионы-источники зимних осадков в Надымской низменности // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 1. С. 98–108.
- Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2008. 91 с.
- Папина Т.С., Малыгина Н.С., Эйрих А.Н., Галанин А.А., Железняк М.Н. Изотопный состав и источники атмосферных осадков в Центральной Якутии // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 2. С. 60–69.
- Сампионов Р.О., Илатовский Ю.В., Пыстина Н.Б., Баранов А.В. Климат п-ова Ямал и последствия его изменения, осложняющие добычу и транспорт углеводородов // Газовая промышленность. 2010. № 2. С. 82–84.
- Слагода Е.А. Опокина О.Л., Курчатова А.Н., Рогов В.В. Строение и разновидности подземных льдов в верхнеплейстоцен-голоценовых отложениях

- Западного Ямала (мыс Марре-Сале) // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 2. С. 9–22.
- Специализированные массивы для климатических исследований // Электронный ресурс. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/> (Дата обращения: 17.03.2025).
- Чижова Ю.Н., Васильчук Ю.К. Дейтериевый эксцесс в снеге и ледниках Полярного Урала и ледовых льдах юга Ямала и побережья Байдарцкой губы // Арктика и Антарктика. 2017. № 2. С. 100–111.
- Чижова Ю.Н., Васильчук Д.Ю., Йошикава К., Буданцева Н.А., Голованов Д.Л., Сорокина О.И., Станиславская Ю.В., Васильчук Ю.К. Изотопный состав снежного покрова Байкальского региона // Лёд и Снег. 2015. Т. 55. № 3 С. 55–66.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-3-55-66>
- Ala-aho P., Soulsby C., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Karlsson J., Serikova S., Vorobyev S.N., Manasyrov R.M., Loiko S., Tetzlaff D. Using stable isotopes to assess surface water source dynamics and hydrological connectivity in a high-latitude wetland and permafrost influenced landscape // J. Hydrol. 2018. V. 556. P. 279–293.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.024>
- Ala-aho P., Welker J.M., Bailey H., Højlund Pedersen S., Kopeck B., Klein E., Mellat M., Mustonen K.-R., Noor K., Marttila H. Arctic Snow Isotope Hydrology: A Comparative Snow-Water Vapor Study // Atmosphere. 2021. V. 12. № 2. 150.
<https://doi.org/10.3390/atmos12020150>
- Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. 1961. V. 133 P. 1702–1703
<https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
- Dansgaard W., Johnsen S.J., Clausen H.B., Gundestrup N. Stable isotope glaciology // Meddelelser om Grønland. 1973. V. 197. № 2. P. 49–53.
- IsoMAP – Isoscapes Modeling, Analysis and Prediction // Электронный ресурс. URL: <https://wateriso.utah.edu/waterisotopes/index.html> (Дата обращения: 17.03.2025).
- Friedman I., Benson C., Gleason J. Isotopic changes during snow metamorphism. Stable isotope geochemistry: A tribute to Samuel Epstein // Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein. The Geochemical Society, Special Publication No. 3 / Eds. H.P. Taylor, Jr., J.R. O'Neil, I.R. Kaplan. San Antonio: The Geochemical Society, 1991. P. 211–221.
- Hughes A.G., Wahl S., Jones T.R., Zuhr A., Hörhold M., White J.W.C., Steen-Larsen H.C. The role of sublimation as a driver of climate signals in the water isotope content of surface snow: laboratory and field experimental results // The Cryosphere. 2021. V. 15 P. 4949–4974.
<https://doi.org/10.5194/tc-2021-87>
- Kurita N., Sugimoto A., Fujii Y., Fukazawa T., Makarov V.N., Watanabe O., Ichiyanagi K., Numaguti A., Yoshida N. Isotopic composition and origin of snow over Siberia // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. D13102.
<https://doi.org/10.1029/2004JD005053>
- Previdi M., Smith K.L., Polvani L.M. Arctic amplification of climate change: are view of underlying mechanisms // Environment Research Letters. 2021. V. 16. 093003.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1c29>
- Lepokurova O.E., Ivanova I.S., Pyryaev A.N. Use of stable isotopes of hydrogen, oxygen and carbon in interpreting the conditions of formation of surface water bodies of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug // Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. 2023. V. 334. № 6. P. 7–19.
- Sommerfeld R.A., Judy C., Friedman I. Isotopic changes during the formation of depth hoar in experimental snowpacks // Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein. The Geochemical Society, Special Publication No. 3 / Eds. H.P. Taylor, Jr., J.R. O'Neil, I.R. Kaplan. San Antonio: The Geochemical Society, 1991. P. 205–210.
- Steen-Larsen H.C., Masson-Delmotte V., Hirabayashi M., Winkler R., Satow K., Prié F., Bayou N., Brun E., Cuffey K.M., Dahl-Jensen D., Dumont M., Guillevic M., Kipfstuhl S., Landais A., Popp T., Risi C., Steffen K., Stenni B., Sveinbjörnsdóttir A.E. What controls the isotopic composition of Greenland surface snow? // Climate Past. 2014. № 10. P. 377–392.
<https://doi.org/10.5194/cp-10-377-2014>
- Taylor S., Feng X., Kirchner J.W., Osterhuber R., Klaue B., Renshaw C.E. Isotopic evolution of a seasonal snowpack and its melt // Water Resources Research. 2001. V. 37. № 3. P. 759–769.
- Water Isotope System for Electronic Retrieval (WISER), its central data hub for isotope and geochemical data in hydrology // Электронный ресурс. URL: <https://nucleus.iaea.org/wiser/explore/> (Дата обращения: 17.03.2025).

Citation: *Fakashchuk N.Yu., Opokina O.L., Khomutov A.V., Dvornikov Yu.A. Isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) of snow cover on the Yamal Peninsula. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2025, 65 (3): 461–475. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376525030087*

Isotopic Composition ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) of Snow Cover on the Yamal Peninsula

© 2025 N.Yu. Fakashchuk^{a,#}, O.L. Opokina^a, A.V. Khomutov^a, Yu.A. Dvornikov^{b,c}

^aEarth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia

^bSmart Urban Nature laboratory, RUDN University, Moscow, Russia

^cLaboratory of carbon monitoring in terrestrial ecosystems, Institute of physicochemical and biological problems of soil science, RAS, Pushchino, Russia

[#]e-mail: n.yu.fakashchuk@yandex.ru

Received March 17, 2024; Revised May 24, 2025; Accepted June 26, 2025

Two field campaigns to study snow cover on the territory of the Yamal Peninsula were undertaken in the spring of 2017–2019 by the scientists of the Earth Cryosphere Institute. One of the study topics was isotopic composition of snow cover and its changes under the influence of external factors. The average values of the snow water isotopes are $\delta^{18}\text{O} = -20.207 \pm 3.3\text{‰}$ and $\delta\text{D} = -152.677 \pm 23.8\text{‰}$. The linear regression equation for snow cover of the study area is $\delta^2\text{H} = 6.8\delta^{18}\text{O} - 15.5$. Deuterium excess has an average value of 9.6‰ with a range of 27.5‰. The isotopic composition of fresh and old snow in high-latitude areas has clear differences. Old snow has higher values of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$; lower values of slope of the regression line and intercept. The isotopic composition of the snow cover does not depend on the location of the sampling points on the peninsula and depends rather on the height and density of the snow cover. The dependencies of the isotopic composition of fresh snow on weather characteristics were confirmed according to weather station data in Salekhard in 1996–2000. The deeper parts of the snow profiles have higher $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values than the upper ones. The average difference between the horizons was 2.83‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and 20.17‰ for δD . The equation of the relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in the deeper horizons has a lower slope and intercept values, as a result of deep hoar horizon metamorphism. The isotopic composition of snow lying on the lake ice surface is heavier than on the soil surface due to its lower height and the influence of lake water during uneven freezing of the water.

Keywords: water isotopes, snow cover, Yamal Peninsula, tundra

REFERENCES

- Babkina E.A., Leibman M.O., Dvornikov Yu.A., Fakashchuk N.Yu., Khairullin R.R., Khomutov A.V.* Activation of cryogenic processes in Central Yamal because of Regional and Local change in climate and thermal state of permafrost. *Meteorologia i Gidrologia*. Russian Meteorology and Hydrology. 2019, 44 (4): 283–290. <https://doi.org/10.3103/S1068373919040083> [In Russian].
- Borodulina G.S., Tokarev I.V., Levichev M.A.* Isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) of the snow cover of Karelia. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2021, 61 (4): 521–532. <https://doi.org/10.31857/S2076673421040105> [In Russian].
- Vasil'chuk Yu.K.* Isotopno-kislorodny sostav podzemnykh ldov (opyt paleogeocriologicheskikh reconstructsii) Isotope-oxygen composition of underground ice (experience of paleogeocryologic reconstructions). Moscow: Publishing House of the Russian Academy of Sciences, 1992, 1: 420 p. [In Russian].
- Vasil'chuk Yu.K., Chizhova Yu.N., Papesh V.* Trend of isotopic composition of individual winter snowfall in northeastern Europe. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2005, 9 (3): 81–87 [In Russian].
- Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.K., Chizhova Ju.N.* Izotopnye metody v geografii. Ch. 3. Geokhimiya stabil'nykh izotopov atmosfery i gidrosfery. Isotope ratios in the environment. Pt. 3. Geochemistry of stable isotopes in the atmosphere and hydrosphere. Moscow: MSU, 2013: 216 p. [In Russian].
- Vasil'chuk Yu.K., Shevchenko V.P., Lisitsyn A.P., Budantseva N.A., Vorobyov S.N., Kirpotin S.N., Kritskov I.V.*

- Manasypov P.M., Pokrovsky O.S., Chizhova Yu.N. Isotope-oxygen and deuterium composition of the snow cover of Western Siberia on a profile from Tomsk to the Ob Bay. *Doklady Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 2016, 471 (5): 770–775 [In Russian].
- Ekaikin A.A. *Stabilie isotopy vody v gliyatsiologii I paleogeographii*. Stable isotopes of water in glaciology and paleogeography. Saint Petersburg: AARI, 2016: 63 p. [In Russian].
- Imshenetskiy V.V., Orlov Yu.N. *SPG tehnologii perspektivnie variant razrabotki gazovykh mestorogdenii na poluostrove Jamal*. LNG technology is a promising option for developing gas resources of the Yamal Peninsula. Moscow, 2005 [In Russian].
- Kotlyakov V.M., Gordienko F.G. *Isotopnaia i geokhimicheskaya gliatsiologia*. Isotope and geochemical glaciology. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1982: 288 p. [In Russian].
- Vasil'chuk Ju.K., Krylov G.V. (Eds). *Criosfera neftegazovykh mestorogdenii na poluostrove Jamal. Ch. I: Criosfera Kharasoveiskogo mestorogdenia*. Cryosphere of oil and gas condensate fields of the Yamal Peninsula: V. 1: Cryosphere of the Kharasaveyskoye gas condensate field. Tyumen: OOO "TyumenNIIgiprogaz"; Saint Petersburg: Nedra, 2006: 347 p. [In Russian].
- Kritsuk L.N. *Podzemniy led Zapadnoy Sibiri*. Underground Ice of Western Siberia. Moscow: Scientific World, 2010: 352 p. [In Russian].
- Lepokurova O.E., Ivanova I.S., Pyryaev A.N. Using Stable Isotopes of Hydrogen, Oxygen, and Carbon in Interpreting the Conditions of Formation of Surface Water Bodies in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. *Bulleten' Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta*. Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. 2023, 334 (6): 7–19 [In Russian].
- Lisitsyn A.P., Vasilchuk Yu.K., Shevchenko V.P., Budantseva N.A., Krasnova E.D., Pantyulin A.N., Filippov A.S., Chizhova Yu.N. Isotope-oxygen composition of water and snow-ice cover of separating reservoirs at different stages of isolation from the White Sea. *Doklady Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 2013, 449 (4): 467–473 [In Russian].
- Malygina N.S., Eirikh A.N., Kurepina N.Yu., Papina T.S. Isotopic composition of winter precipitation and snow cover in the Altai foothills. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (1): 57–68. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-1-57-68> [In Russian].
- Malygina N.S., Eirikh A.N., Agbalyan E.V., Papina T.S. Isotopic composition and source regions of winter precipitation in the Nadym Lowland. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (1): 98–108 [In Russian].
- Otsenochinii doklad klimaticheskikh izmenenii i ikh posledstviy na territorii Rossii. Assessment report on climate change and its consequences in the territory of the Russian Federation. Moscow: Roshydromet, 2008: 91 p. [In Russian].
- Papina T.S., Malygina N.S., Eirikh A.N., Galanin A.A., Zheleznyak M.N. Isotopic composition and sources of atmospheric precipitation in Central Yakutia. *Kriosfera Zemli*. Cryosphere of the Earth. 2017, 21 (2): 60–69 [In Russian].
- Sampsonov R.O., Ilatovsky Yu.V., Pystina N.B., Baranov A.V. Climate of the Yamal Peninsula and the consequences of its change, complicating the production and transportation of hydrocarbons. *Gazovaya promyshlennost'*. Gas Industry. 2010, 2: 82–84 [In Russian].
- Slogoda E.A., Opokina O.L., Kurchatova A.N., Rogov V.V. Structure and varieties of underground ice in the Upper Neopleistocene-Holocene deposits of Western Yamal (Cape Marre-Sale). *Criosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2012, 16 (2): 9–22 [In Russian].
- Spetsializirovannyye massivy dlya klimaticheskikh issledovaniy. Specialized arrays for climate research: Electronic data. Retrieved from: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/> (Last access: March 17, 2025) [In Russian].
- Chizhova Yu.N., Vasilchuk Yu.K. Deuterium excess in snow and glaciers of the Polar Urals and massive ice in the south of Yamal and the coast of Baydaratskaya Bay. *Arctica i Antarctica*. Arctic and Antarctic. 2017, 2: 100–111 [In Russian].
- Chizhova J.N., Vasilchuk J.Y., Yoshikawa K., Budantseva N.A., Golovanov D.L., Sorokina O.I., Stanilovskaya J.V., Vasil'chuk Yu.K. Isotope composition of snow cover in the Lake Baikal area. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2015, 55 (3): 55–66. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-3-55-66> [In Russian].
- Ala-aho P., Soulsby C., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Karlsson J., Serikova S., Vorobyev S.N., Manasypov R.M., Loiko S., Tetzlaff D. Using stable isotopes to assess surface water source dynamics and hydrological connectivity in a high-latitude wetland and permafrost influenced landscape. *J. Hydrol.* 2018, 556: 279–293 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.024>
- Ala-aho P., Welker J.M., Bailey H., Højland Pedersen S., Kopeck B., Klein E., Mellat M., Mustonen K.-R., Noor K., Marttila H. Arctic Snow Isotope Hydrology: A Comparative Snow-Water Vapor Study. *Atmosphere*. 2021, 2: 150. <https://doi.org/10.3390/atmos12020150>
- Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*. 1961, 133: 1702–1703 <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
- Dansgaard W., Johnsen S.J., Clausen H.B., Gundestrup N. Stable isotope glaciology // *Meddelelser om Grønland*. 1973, 197 (2): 49–53.
- IsoMAP – Isoscapes Modeling, Analysis and Prediction: Electronic data. Retrieved from: <https://wateriso.utah.edu>

- edu/waterisotopes/index.html (Last access: March 17, 2025).
- Friedman I., Benson C., Gleason J.* Isotopic changes during snow metamorphism. In: H.P. Taylor, Jr., J.R. O'Neil, I.R. Kaplan (Eds). *Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein*. The Geochemical Society, Special Publication No. 3. San Antonio: The Geochemical Society, 1991: 211–221.
- Hughes A.G., Wahl S., Jones T.R., Zuhr A., Hörhold M., White J.W.C., Steen-Larsen H.C.* The role of sublimation as a driver of climate signals in the water isotope content of surface snow: laboratory and field experimental results. *The Cryosphere*. 2021, 15: 4949–4974. <https://doi.org/10.5194/tc-2021-87>
- Kurita N., Sugimoto A., Fujii Y., Fukazawa T., Makarov V.N., Watanabe O., Ichiyangi K., Numaguti A., Yoshida N.* Isotopic composition and origin of snow over Siberia. *J. Geophys. Res.* 2005, 110: D13102. <https://doi.org/10.1029/2004JD005053>
- Previdi M., Smith K.L., Polvani L.M.* Arctic amplification of climate change: are view of underlying mechanisms. *Environ. Res. Lett.* 2021, 16: 093003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1c29>
- Lepokurova O.E., Ivanova I.S., Pyryaev A.N.* Use of stable isotopes of hydrogen, oxygen and carbon in interpreting the conditions of formation of surface water bodies of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering*. 2023, 334 (6): 7–19.
- Sommerfeld R.A., Judy C., Friedman I.* Isotopic changes during the formation of depth hoar in experimental snowpacks. In: H.P. Taylor, J.R. O'Neil and I.R. Kaplan (Eds). *Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein*. The Geochemical Society, Special Publication No. 3. San Antonio: The Geochemical Society, 1991: 205–210.
- Steen-Larsen H.C., Masson-Delmotte V., Hirabayashi M., Winkler R., Satow K., Prié F., Bayou N., Brun E., Cuffey K.M., Dahl-Jensen D., Dumont M., Guillevic M., Kipfstuhl S., Landais A., Popp T., Risi C., Steffen K., Stenni B., Sveinbjörnsdóttir A.E.* What controls the isotopic composition of Greenland surface snow? *Clim. Past*. 2014, 10: 377–392. <https://doi.org/10.5194/cp-10-377-2014>
- Taylor S., Feng X., Kirchner J.W., Osterhuber R., Klaue B., Renshaw C.E.* Isotopic evolution of a seasonal snowpack and its melt. *Water Resources Research*. 2001, 37(3): 759–769.
- Water Isotope System for Electronic Retrieval (WISER), its central data hub for isotope and geochemical data in hydrology: Electronic data. Retrieved from: <https://nucleus.iaea.org/wiser/explore/> (Last access: March 17, 2025).