

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) ЛЕДНИКОВОГО ЛЬДА КАМЧАТКИ: СВЯЗЬ С СОВРЕМЕННЫМИ КЛИМАТИЧЕСКИМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ В ТИХООКЕАНСКОМ РЕГИОНЕ

© 2024 г. Ю. Н. Чинова^{1,2*}, В. Н. Михаленко^{2,3}, И. А. Корнева^{2,3},
Я. Д. Муравьев⁴, А. Г. Хайрединова², М. А. Воробьев²

¹Институт геологии рудных месторождений, петрологии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, Москва, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия

³Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия

⁴Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

*e-mail: eacentr@yandex.ru

Поступила 02.05.2024 г.

После доработки 06.06.2024 г.

Принята к печати 08.07.2024 г.

Определены изотопные характеристики ледникового льда, полученного в ходе бурения в кратере вулкана Ушковский в 2022 г. Керна длиной 14 м датирован путём подсчёта годовых слоёв по положительным пикам значений $\delta^{18}\text{O}$ и пепловым горизонтам. Полученные значения $\delta^{18}\text{O}$ годовых слоёв не отражают связи с температурами воздуха, однако по величине дейтериевого эксцесса была установлена связь изотопных параметров ледникового льда с температурами поверхности океана в районе формирования атмосферной влаги, которая впоследствии поступала на поверхность ледника в кратере вулкана Ушковский.

Ключевые слова: Камчатка, ледниковый лёд, изотопный состав кислорода, дейтериевый эксцесс, аномалии температуры поверхности океана, Тихоокеанский регион

DOI: 10.31857/S2076673424030053, EDN: IODTKG

ВВЕДЕНИЕ

Ледниковые керны представляют собой архив гидрохимического состава атмосферы, а изотопные параметры льда содержат информацию об условиях конденсации влаги, истории её поступления к леднику и об изменениях в источнике влаги. В отличие от ледниковых покровов Антарктиды и Гренландии, где получение глубоких кернов позволило реконструировать смену основных климатических эпох (Jouzel et al., 1987; Dansgaard et al., 1993; Jouzel et al., 2007), горные ледники охватывают меньшие временные диапазоны, и кроме того, имеют гораздо более сложную картину формирования изотопного состава.

Считается, что временные ряды $\delta^{18}\text{O}$ ледниковых кернов из немуссонной области фиксируют изменение температуры, а в пределах муссонной области являются сигналом интенсивности муссонов (Tian et al., 2006; Kang et al., 2010; Thompson et al., 2018; Yu et al., 2020). Очевидно, что изотопную запись по ледниковым кернам из муссонной области интерпретировать труднее. Однако нередко именно

ледники служат единственными многолетними палеоархивами, которые имеют непрерывную и ненарушенную запись вплоть до настоящего времени.

Климатические изменения в Тихоокеанском регионе находят своё отражение в изотопных характеристиках ледникового льда Ключевской группы вулканов на Камчатке и ледникового плато на горе Логан в Северной Америке. На горе Логан было получено несколько ледяных кернов, изотопные исследования которых показали, что малый ледниковый период характеризовался увеличением уровней аккумуляции и возрастанием величин $\delta^{18}\text{O}$ льда. Возрастание величин $\delta^{18}\text{O}$ льда противоречит другим палеоархивам, зафиксировавшим в это время выраженное похолодание. Было установлено, что ледниковый лёд на горе Логан представляет собой индикатор не температур воздуха, а смены циркуляционных эпох (Fisher et al., 2004). На Камчатке в кратере Горшкова на вулкане Ушковский в 1998 г. был получен ледяной керн К–2 глубиной 140 м, охватывающий временной промежуток в 263 года. По изотопной записи было высказано

предположение о незначительном увеличении температур воздуха на границе 1880–1910 гг., о корреляции уровней аккумуляции и значений $\delta^2\text{H}$ в десятилетнем и междесятилетнем масштабах, а также о выраженной корреляции значений $\delta^2\text{H}$ с температурами поверхности моря центральных районов северной части Тихого океана (Shiraiwa et al., 2001; Sato et al., 2013). Эти работы свидетельствуют о том, что глобальные климатические и циркуляционные изменения в Тихоокеанском регионе оказывают большое влияние на формирование изотопных параметров ледникового льда Камчатки.

В настоящей работе рассматриваются новые данные о распределении значений $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d-excess ледникового льда в неглубоком керне, отобранном в 2022 г. в кальдере вулкана Ушковский. Основная цель работы — установить основные факторы, формирующие изотопные характеристики ледникового льда и установить связь между изотопными параметрами льда и локальными или глобальными климатическими изменениями в Тихоокеанском регионе. Особенности Камчатки — сочетание морского и континентального типов климата при суровых температурных условиях, избыточном увлажнении и большой роли циклонической деятельности — делают интерпретацию записи $\delta^{18}\text{O}$ льда сложной задачей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вулкан Ушковский (56.04° с.ш., 160.28° в.д.) расположен в центральной части Камчатского полуострова (рис. 1). Кратер Горшкова ~750 м в диаметре и глубиной ~240 м заполнен ледниковым льдом. Среднегодовые температуры ледника на глубине 10 м составляют -15.8°C (Sato et al., 2013). Бурение ледника в кратере Горшкова на высоте 3950 м было выполнено в сентябре 2022 г. при помощи установки GeoTech. Ледяной керн длиной 14 м доставлялся в Москву в замороженном состоянии. Первичное описание керна, нарезка образцов и пробоподготовка выполнялись в холодной лаборатории при температуре -20°C . Образцы льда, полученные нарезанием ледяного керна с шагом 5 см, плавили при температуре $+24^\circ\text{C}$ в пластиковых пробирках, герметизированных лентой парафилем.

Изотопный анализ образцов был выполнен на анализаторе Picarro L2130-i в лаборатории палеоэкологических реконструкций Института географии РАН. Для калибровки измеренных значений в каждой серии измерений анализировались международные стандарты (USGS-45, USGS-46, USGS-47). Точность измерений составила 0.14‰ для значений $\delta^{18}\text{O}$ и 1‰ для значений $\delta^2\text{H}$.

Для анализа аномалий температуры поверхности океана использовались данные глобального архива HadSST 4.0.1.0 (<https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadsst4/>), которые представляют собой

среднемесячные аномалии температуры поверхности воды по различным данным наземных наблюдений за 1850–2023 гг. на регулярной сетке $5^\circ \times 5^\circ$ (Kennedy et al., 2019).

Для расчёта адвекции влаги в регионе были использованы данные реанализа ERA5 (Hersbach et al., 2020) с часовым разрешением и пространственным разрешением 31 км на уровне изобарической поверхности 600 гПа (около 4 км). За период 2006–2022 гг. были получены среднесуточные значения, по которым адвекция влаги Q ($\text{г/кг}\times\text{с}^{-1}$) рассчитывалась как:

$$Q = u \frac{q}{x} + v \frac{q}{y}, \quad (1)$$

где u и v — горизонтальные компоненты скорости ветра (м/с), q — удельная влажность (г/кг), ось x направлена вдоль широтного круга с запада на восток, ось y — вдоль меридиана с юга на север.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ льда варьируют от -16 до -24 ‰ и от -110.5 до -177.7 ‰ (рис. 2) при средних значениях -20.5 и -150.2 ‰, соответственно. Величина дейтериевого эксцесса меняется по глубине от 8.7 до 21.3‰ при среднем значении 13.7‰. Зимние горизонты в среднем характеризуются величинами $\delta^{18}\text{O}$ от -19 до -24 ‰ и значениями d-excess 12...16‰ (и выше), для летних характерны значения $\delta^{18}\text{O}$ от -16 до -18 ‰ и d-excess от 9 до 12‰. Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ льда формируют линейный тренд, описываемый уравнением $\delta^2\text{H} = 7.47 \times \delta^{18}\text{O} + 2.9$ (рис. 3). Величина наклона и свободного члена в этом уравнении отличается от глобальной линии метеорных вод (далее — ГЛМВ), что, вероятно, связано с сезонной динамикой дейтериевого эксцесса в атмосферных осадках. Наблюдения на метеорологической станции г. Петропавловск-Камчатский с 1996 по 1999 г. показали слабо выраженные сезонные тренды изменения d-excess атмосферных осадков. Данные по этой станции плохо отражают условия накопления осадков в кратере вулкана Ушковский из-за больших различий в абсолютных высотах и географическом положении. Очевидно, что изотопные параметры осадков, выпадающие на Ушковском вулкане, фиксируют глобальные условия региона. Другими ближайшими районами, по которым доступны изотопные данные по атмосферным осадкам за гораздо более продолжительный период, являются Японские острова (станции Кумамото и Риори). Для этих станций выражен сезонный ход дейтериевого эксцесса осадков — повышение до 25‰ зимой и понижение до 5–10‰ летом (GNIP Database, <https://nucleus.iaea.org/wiser>, 01.10.2023). Окружающие Камчатку Охотское и Берингово моря во все сезоны служат источником влаги, в осенний сезон

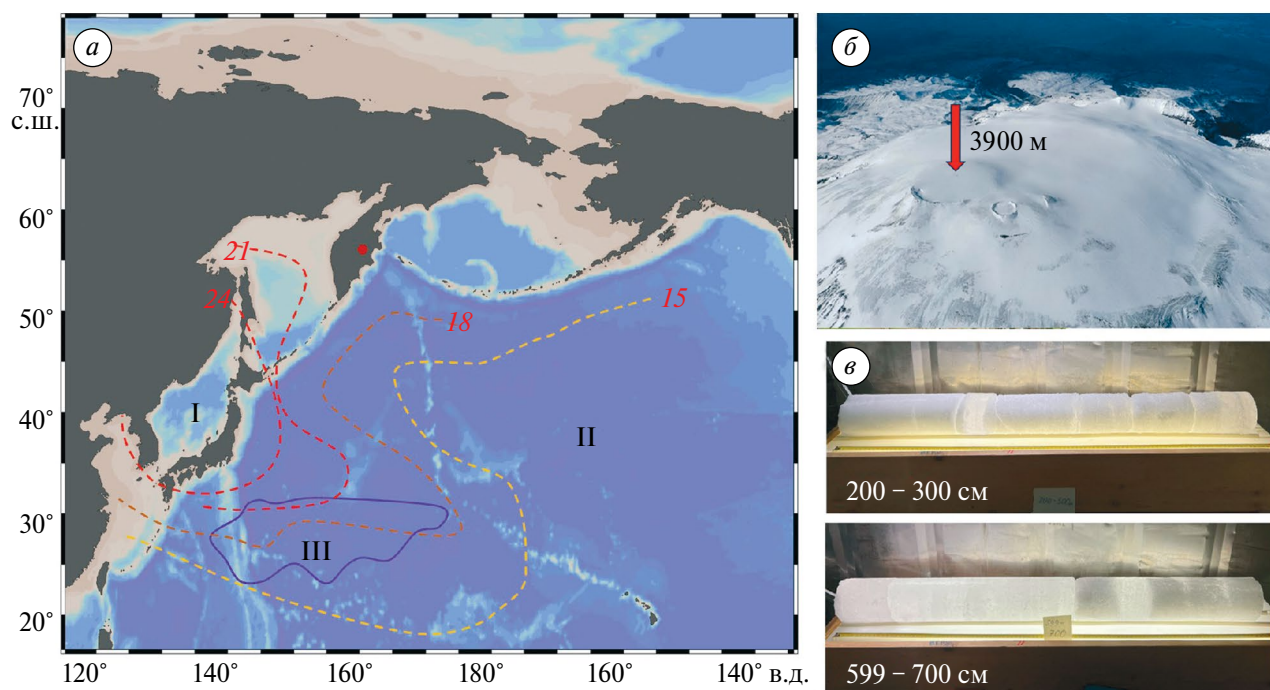


Рис. 1. Район исследований (а), точка бурения (б) и секции ледяного керна (в). На фрагменте (а) показаны основные источники водяного пара, обеспечивающие выпадение атмосферных осадков в зимний период (по Pfahl, Sodemann, 2014): I – район с высокими значениями дейтериевого эксцесса водяного пара (более 25‰); II – район с величинами d-excess водяного пара от 12 до 15‰. Также показана область (III) наибольшей корреляции между значениями $\delta^2\text{H}$ ледникового льда в кратере Горшкова с температурами поверхности моря (по Sato et al., 2013)

Fig. 1. Study area (a), drilling location (b) and ice core sections (c). Fragment (a) shows the main sources of water vapor that provide precipitation in winter (according to Pfahl, Sodemann, 2014): I – area with high values of deuterium excess of water vapor (more than 25‰); II – region with water vapor d-excess values from 12 to 15‰. Also shown the region (III) of the greatest correlation between the $\delta^2\text{H}$ values of glacial ice in the Gorshkov crater with sea surface temperatures (after Sato et al., 2013)

и в начале зимы большое влияние приобретают циклоны, приносящие осадки с Японского и Жёлтого морей. Поэтому те же черты сезонного хода дейтериевого эксцесса, что были отмечены для осадков на Японских островах, присущи и Камчатке. В целом сезонная картина распределения изотопных характеристик выражается в низких значениях $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^2\text{H}$) и высоких d-excess зимой, и в высоких значениях $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^2\text{H}$) при низких значениях d-excess летом.

В стратиграфии керна отмечается большое количество горизонтов высокой плотности, что, учитывая небольшую глубину керна, говорит об участии жидкой воды в формировании льда. Замерзание жидкой воды отражается в соотношении $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$: для метаморфического льда наклон в координатах $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ наследуется от атмосферных осадков и в общем случае близок 8; для конгеляционного льда, образованного в условиях открытой системы, наклон равен 7.29, а в условиях закрытой системы наклон линии тренда $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ льда связан исключительно с изотопными параметрами начальной воды (Souchez, Jouzel, 1984).

Выпадение жидких атмосферных осадков на низкотемпературную поверхность ледника и их быстрое замерзание, так же, как и инфильтрация талых вод и формирование инфильтрационного льда не может сильно нарушать установленное для ледникового льда соотношение $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ с наклоном 7.47. Замерзание жидкой воды в порах фирна или снега, если водонасыщенный горизонт подстилается водоупором и охлаждается сверху, будет происходить в условиях закрытой системы. Два участка ледяного керна, где такая картина могла иметь место, это горизонты на глубинах 2.59–3.31 и 6.0...6.35 м водного эквивалента (м в.экв.), наклоны составили 6.47 и 6.34, соответственно. Скорее всего, реализация условий закрытой или открытой системы при замерзании жидкой воды связана с количеством воды атмосферных осадков. В любом случае горизонты конгеляционного и инфильтрационного льда значительно затрудняют интерпретацию изотопной записи. Так, мы столкнулись с трудностями в датировании изотопной записи на глубинах от 2.5 до 4.5 м в.экв.

Проблему датирования нарушенной изотопной записи могут решить дополнительные маркеры, такие как горизонты вулканических пеплов.

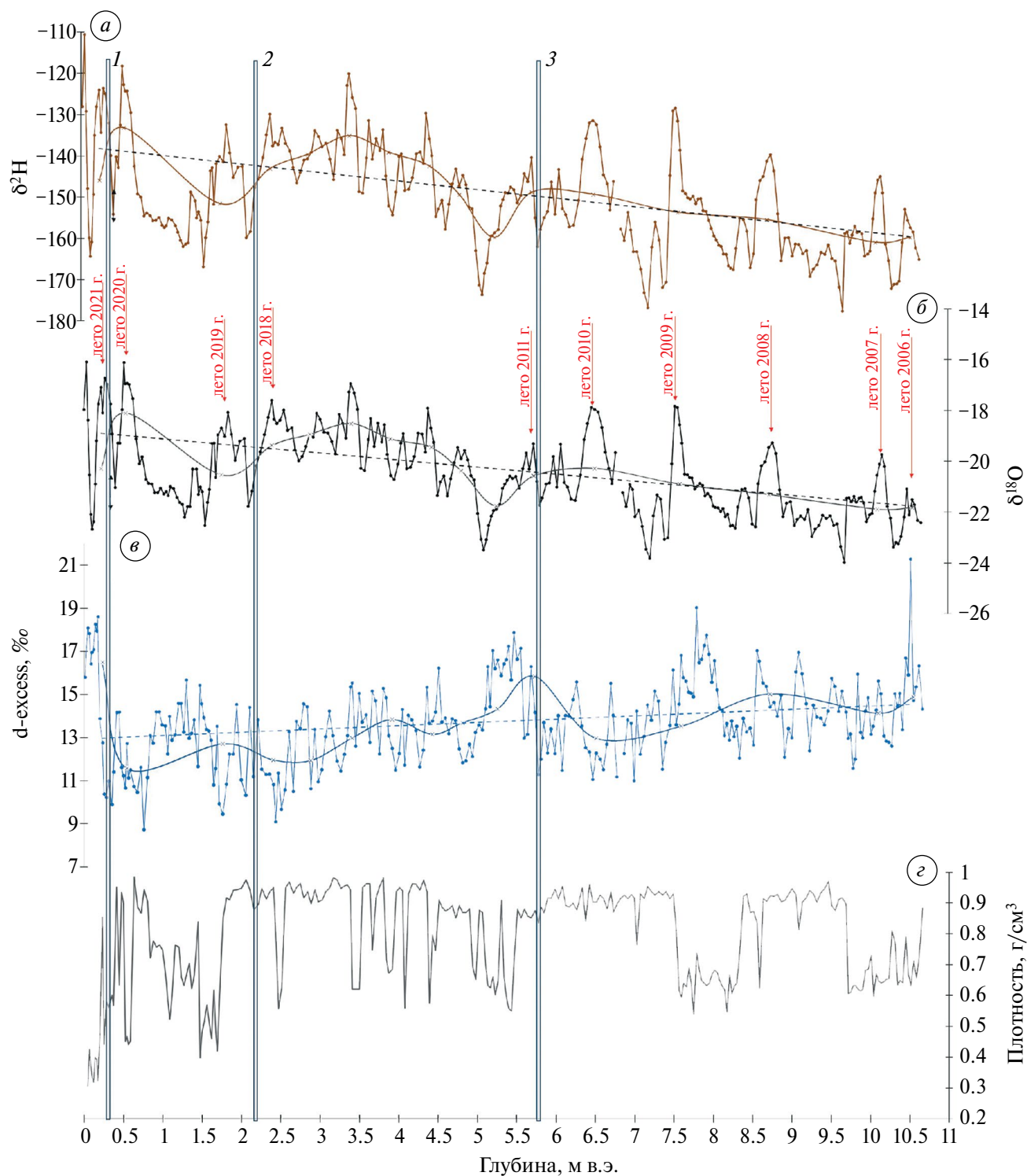


Рис. 2. Распределение значений $\delta^2\text{H}$ (а), $\delta^{18}\text{O}$ (б), d-excess (в) и плотности (г) льда по глубине. Сглаженными линиями показаны среднегодовые значения, прерывистыми – общий тренд среднегодовых значений. Стрелки указывают на середину летнего сезона. Извержения вулканов (по Горбач и др., 2024): 1 – Безымянный октябрь 2020 г.; 2 – Шивелуч в декабре 2018 г.; 3 – Безымянный, Ключевской и Кизимен 2010–2011 гг.

Fig. 2. Distribution of values of $\delta^2\text{H}$ (а), $\delta^{18}\text{O}$ (б), d-excess (в) and density (г) of ice over depth. Smooth lines show average annual values, dashed lines show the general trend of average annual values. The arrows point to the middle of the summer season. Volcanic eruptions (according to Gorbach et al., 2024): 1 – Bezimyanny October 2020; 2 – Shiveluch in December 2018; 3 – Bezimyanny, Klyuchevskoy and Kizimen 2010–2011

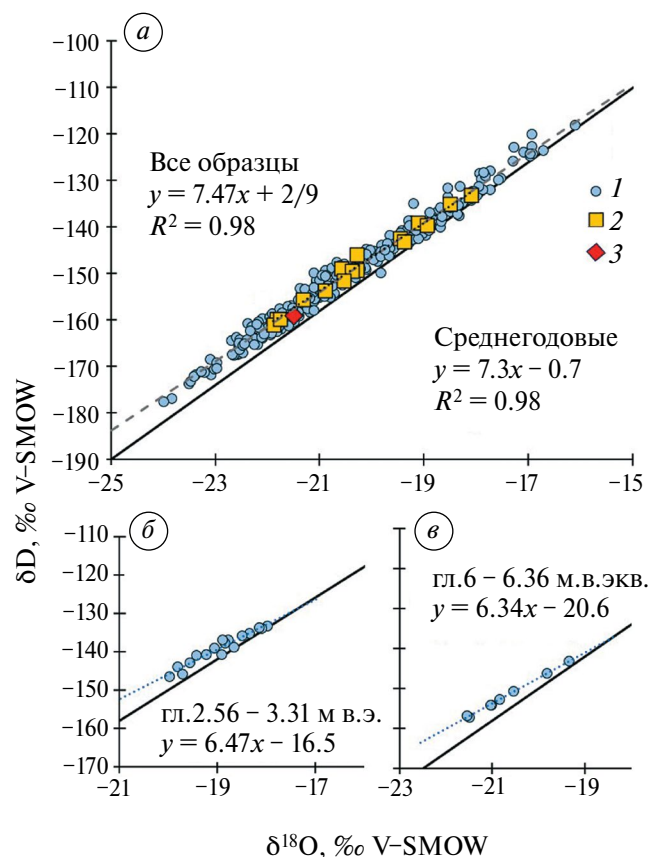


Рис. 3. Соотношение $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ для образцов ледникового льда: а – все образцы (1), среднегодовые значения (2) и среднее по керну К-2 (из Sato et al., 2013; Shiraiwa, Yamaguchi, 2002); б – образцы с глубин 2.56–3.31 м в.экв.; в – образцы с глубин 6.0...6.36 м в.экв.

Fig. 3. The $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ ratio for glacial ice samples: а – all samples (1), average annual values (2) and average for core K-2 (from Sato et al., 2013; Shiraiwa, Yamaguchi, 2002); б – samples from depths of 2.56–3.31 m eq.; в – samples from depths of 6.0...6.36 m w.e.

Химический состав вулканических стёкол позволяет определить извержение каких вулканов их сформировало (Горбач и др., 2024). Пепел образца с глубины 89–94 см (0.414–0.445 м в.экв.) соответствует извержению вулкана Безымянного, которое, наиболее вероятно, произошло в октябре 2020 г. Эта датировка полностью совпадает с датированием изотопной записи по величинам $\delta^{18}\text{O}$ (см. рис. 2). Для пеплов с глубины 348–354 см (2.259–2.314 м в.экв.) были отмечены единичные частицы с риолитовым составом стекла, что привело к выводу о возможном извержении вулкана Шивелуч в декабре 2018 г. (Горбач и др., 2024), что также хорошо соответствует изотопной записи. А для горизонта пеплов с глубин 761–777 см (5.683–5.813 м в.экв.) был сделан

вывод о наложении извержений сразу нескольких вулканов (Безымянный, Ключевской и Кизимен), последовательное извержение которых было характерно для 2010–2011 гг. Именно в этом интервале глубин (от 2.56 до 4.5 м в.экв.) отмечается присутствие конжеляционного льда, сформированного в закрытой системе, и частые горизонты льда, сформированного быстрым замерзанием жидкой воды в открытой системе. Таким образом, опираясь на датировку по слою 761–777 см, этот горизонт можно отнести к лету 2011 г. Нижележащие горизонты датированы по положительным пикам величин $\delta^{18}\text{O}$ как маркеров тёплого периода, так как отрицательные пики, характерные для зимнего периода, проявлены хуже. Границы годовых слоев проведены посередине летнего периода, что позволило рассчитать среднегодовые величины $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d-excess (см. рис. 2; табл. 1). Учитывая, что толщина льда в 10.5 м в.экв. сформировалась за 16 лет, средняя годовая аккумуляция составляла 0.66 м в.экв., что хорошо согласуется со сделанными ранее оценками (Shiraiwa et al., 2001; Sato et al., 2013).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изотопные характеристики осадков, зависящие в глобальном масштабе от температуры приземного слоя воздуха (Dansgaard, 1964), формируют изотопную запись ледникового льда путём последовательного накопления и уплотнения снега. Процессы выпадения осадков, в целом, являются равновесными, благодаря чему в глобальном масштабе осадки соответствуют ГЛМВ (Gat, 2000). Выраженная связь между величинами $\delta^{18}\text{O}$ и температурами приземного слоя воздуха (Dansgaard, 1965) позволяет использовать изотопный состав кислорода ледниковых льдов для палеоклиматических реконструкций. Однако зависимость $\delta^{18}\text{O}$ –Т в глобальном масштабе присущая атмосферным осадкам не всегда характерна для ледникового льда.

Увеличение значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, выраженное в 14-метровом ледниковом керне от 2006 к 2022 гг., по нашему мнению, не связано с изменением локальных температур. Несмотря на то, что для Камчатки в последние десятилетия отмечаются положительные тренды температур воздуха, составляющие в среднем $+0.4^\circ\text{C}/10$ лет (Korneva et al., 2024), среднегодовые значения $\delta^{18}\text{O}$ и $T_{\text{ср.год}}$ и, в целом, не коррелируют ($r^2 = 0.2$). Основной причиной увеличения значений $\delta^{18}\text{O}$ ледникового льда было не повышение температур воздуха, а изменение в соотношении накопления зимних и летних сезонных осадков на леднике.

Влияние сезонности на формирование изотопной записи. На Камчатку поступает большое количество водяного пара с обширной океанской территории.

Таблица 1. Среднегодовые величины $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d-excess и расчётное изменение температуры поверхности океана в соответствующий период осреднения

Период	Глубины слоя, м.в.ЭКВ.	Среднегодовые величины			Относительно среднего по керну				ΔT
		$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	d-exc	$\Delta\delta^{18}\text{O}$	$\Delta\delta^2\text{H}$	$\Delta\text{d-exc}$	$\Delta\text{d-exc}$ сезон	
2006–2007	10.55	–21.8	–159.8	14.9	–1.6	–11.8	1.2	1.1	0.1
2007–2008	10.10	–21.9	–161	14.1	–1.7	–13.0	0.4	1.2	–1.8
2008–2009	8.73	–21.3	–155.5	15.0	–1.1	–7.5	1.3	0.8	1.3
2009–2010	7.59	–20.9	–153.7	13.5	–0.7	–5.8	–0.2	0.5	–1.6
2010–2011	6.51	–20.3	–149.3	13.0	–0.1	–1.4	–0.7	0.1	–1.8
2011–2012	5.74	–20.6	–148.8	15.8	–0.4	–0.9	2.2	0.3	4.5
2012–2013	5.26	–21.8	–159.8	14.3	–1.6	–11.8	0.6	1.1	–1.1
2013–2014	4.81	–20.4	–149.4	13.7	–0.2	–1.5	0.0	0.1	–0.3
2014–2015	4.43	–19.5	–142.5	13.1	0.8	5.5	–0.5	–0.5	0.0
2015–2016	3.92	–19.1	–139.1	13.8	1.1	8.9	0.2	–0.8	2.2
2016–2017	3.41	–18.5	–135.1	13.0	1.7	12.8	–0.7	–1.2	1.1
2017–2018	2.89	–18.9	–139.6	11.9	1.3	8.4	–1.8	–0.9	–2.1
2018–2019	2.41	–19.4	–143.1	12.0	0.8	4.9	–1.7	–0.6	–2.7
2019–2020	1.77	–20.5	–151.6	12.7	–0.3	–3.7	–1.0	0.2	–2.9
2020–2021	0.54	–18.1	–133.2	11.6	2.1	14.8	–2.1	–1.5	–1.5
2021–2022	0.23	–20.3	–145.9	16.5	–0.1	2.1	2.8	0.1	6.5
Среднее		–20.2	–148.0	13.7					

По работе (Sato et al., 2013) на основе корреляции температуры воздуха на высоте 2 м (по данным ERA40 reanalysis) со значениями $\delta^2\text{H}$ ледяного керна можно заключить, что основным источником пара для осадков на Ушковском вулкане являются районы Тихого океана 20–30° с.ш. и 160–180° в.д. (см. рис., район III). Учитывая большую изменчивость циркуляционных условий в течение года, можно говорить о том, что источником водяного пара для Ушковского служит не только Тихий океан, но и ближайшие к Камчатке моря: Охотское и Японское. Сезонная смена основных источников влаги, а также сезонное изменение условий испарения водяного пара над поверхностью океана (Yoshimura, Ichiyanagi, 2009), отражаются в изменениях величины дейтериевого эксцесса атмосферных осадков региона.

Согласно (Craig, Gordon, 1965; Merlivat, Jouzel, 1979) изотопный состав водяного пара над океаном определяется равновесными и кинетическими коэффициентами изотопного фракционирования, а также величиной относительной влажности. Равновесные коэффициенты зависят от температуры поверхности океана (ТПО), кинетические являются константой. Величина дейтериевого эксцесса становится выше с увеличением ТПО (0.35‰/°C) и ниже с увеличением относительной влажности (–0.43‰/%) (Pfahl, Sodemann, 2014).

Измерения d-excess в водяном паре пограничного слоя показывают, что относительная влажность над поверхностью океана отрицательно коррелирует с d-excess водяного пара, причём наблюдения проводились в разных регионах, охватывали широкий диапазон условий испарения и были получены с использованием разных подходов (Pfahl, Sodemann, 2014 и ссылки в ней). Это указывает на доминирующую, универсальную связь между d-excess водяного пара, испаряющегося с поверхности океана, и приповерхностной относительной влажностью и находится в полном соответствии с теоретическими соображениями (Craig, Gordon, 1965; Merlivat, Jouzel, 1979).

Поскольку зимой температура атмосферного воздуха над океаном значительно ниже температуры поверхности воды, то относительная влажность уменьшается, что приводит к увеличению d-excess пара. Водяной пар с высокими d-excess может иметь происхождение как из северных районов Тихого океана, так и из акватории Японского моря (Uemura et al., 2012). Расчёты, выполненные в работе (Pfahl, Sodemann, 2014), также показывают, что Японское море и Тихий океан к востоку от Японии (см. рис. 4, район I) в зимний период служат основным источником водяного пара с высокими величинами d-excess, в более восточных районах Тихого океана (см. рис. 4, район II) величина d-excess пара заметно падает вслед за увеличением

относительной влажности. Летом температура воздуха над океаном близка к температуре воды, испарение происходит при высокой относительной влажности, что приводит к низким значениям d-excess водяного пара. Таким образом, летние осадки почти всегда имеют низкие величины d-excess, в то время как d-excess зимних осадков зависит от того, из какой области Тихого океана принесена влага.

В распределении значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в ледяном керне 2022 г. заметен слабый тренд повышения значений с глубины 10.66 м в.экв. к поверхности (см. рис. 2) на фоне уменьшения величин d-excess. Изменения среднегодовых значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ (см. табл. 1) происходит согласно линии с наклоном 7.3, что близко к установленной линии регрессии по всем образцам (см. рис. 3), которая в случае ледникового льда на Ушковском вулкане представляет собой линию смещения осадков зимнего и летнего периодов. Среднегодовые значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ льда отражают пропорции количественного вклада этих осадков в годовой слой. Интересно, что этой линии смещения в целом соответствуют и средние значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ по керну К-2, полученному здесь же в 1998 г. (см. рис. 3).

Для опубликованных ранее значений $\delta^{18}\text{O}$ в керне К-2 были отмечены тренды повышения и понижения среднегодовых значений: осреднённые с шагом 5 лет среднегодовые значения $\delta^{18}\text{O}$ для 19 в. составили $-22 \pm 1\text{‰}$ и повысились в XX в. до -21.2‰ (Shiraiwa, Yamaguchi, 2002), что, по мнению авторов, связано с повышением температур воздуха в регионе. Среднегодовые значения $\delta^2\text{H}$ для керна К-2, датированного с 1735 по 1997 г., приводятся в работе (Sato et al., 2013), среднее значение по всему керну составило -160.1‰ (Sato et al., 2013). На основе этих данных — среднегодовых и многолетних трендов значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ — были сделаны предположения, что изотопная запись по Камчатским ледникам отражает климатические колебания, произошедшие за последние 260 лет (Shiraiwa, Yamaguchi, 2002; Sato et al., 2013).

По сравнению с периодом 1800–1998 гг., судя по данным (Shiraiwa, Yamaguchi, 2002; Sato et al., 2013), в 2006–2022 гг. общий диапазон вариаций $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ значительно уменьшился, а среднегодовые значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ возросли (рис. 4). Поскольку это возрастание среднегодовых величин $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ сопровождается уменьшением d-excess, мы полагаем, что основной причиной таких изменений послужило увеличение доли атмосферных осадков летнего и переходных сезонов (осени и весны).

Изменения в источнике влаги. Изменения среднегодовых величин дейтериевого эксцесса (d-excess = $\delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$) вследствие изменения пропорций сезонного смещения (вдоль линии

$\delta^2\text{H} = 7.3\delta^{18}\text{O} - 0.7$), для среднегодовых значений, должны соответствовать уравнению:

$$\Delta \text{d-excess} = \Delta \delta^2\text{H} - 8\Delta \delta^{18}\text{O}$$

$$\Delta \delta^2\text{H} / \Delta \delta^{18}\text{O} = 7.3$$

$$\Delta \text{d-excess}_{\text{сезон}} = 7.3\Delta \delta^{18}\text{O} - 8\Delta \delta^{18}\text{O} = -0.7\Delta \delta^{18}\text{O} \quad (2).$$

В табл. 1 приведены величины $\Delta \text{d-excess}_{\text{сезон}}$ (рассчитанные по уравнению 2). Если они близки к общему изменению $\Delta \text{d-excess}$ годового слоя относительно среднего по керну, то можно говорить о формировании изотопного сигнала за счёт изменения пропорций сезонных осадков, в случае большого отличия дейтериевый эксцесс является показателем влияния других факторов.

На изменение величин d-excess атмосферных осадков может влиять как изменение условий испарения в источнике влаги, так и изменение положения основного источника происхождения осадков. Наибольшее влияние изменений в источнике пара отмечается в горизонтах 2011–2012 и 2021–2022 гг. Если предположить, что основные источники не менялись, а сезонные изменения в относительной влажности на поверхности моря, приводящие к формированию высоких d-excess водяного пара, уже учитываются в сезонности изотопных параметров осадков, то дополнительные изменения величин d-excess (относительно уравнения 2) должны быть связаны с изменением температур поверхности океана. Будем полагать, что изменение значения $\delta^{18}\text{O}$ конкретного года от среднего значения по керну ($\Delta \delta^{18}\text{O}$) обусловлено изменением пропорцией сезонного смещения ($\Delta \delta^{18}\text{O}_{\text{сезон}}$) и изменением ТПО в источнике влаги:

$$\Delta \delta^{18}\text{O} = \Delta \delta^{18}\text{O}_{\text{сезон}} + 0.1\Delta T,$$

где ΔT — изменение ТПО, коэффициент $\delta^{18}\text{O}/\text{ТПО} = 0.1\text{‰}/^\circ\text{C}$ (согласно модели Merlivat, Jouzel, 1979).

Таким образом,

$$\Delta \delta^{18}\text{O}_{\text{сезон}} = \Delta \delta^{18}\text{O} - 0.1\Delta T \quad (3)$$

Воспользовавшись коэффициентом d-excess/ТПО = $0.35\text{‰}/^\circ\text{C}$ (по Pfahl, Sodemann, 2014), с учётом уравнения (2) подобным образом выразим изменения дейтериевого эксцесса:

$$\Delta \text{d-excess} = -0.7\Delta \delta^{18}\text{O}_{\text{сезон}} + 0.35\Delta T \quad (4)$$

Подставив уравнение (3) в уравнение (4), получим:

$$\Delta \text{d-excess} = -0.7(\Delta \delta^{18}\text{O} - 0.1\Delta T) + 0.35\Delta T \quad (5)$$

Решив уравнение (5), получаем значения изменения ТПО (ΔT) в источнике влаги (см. табл. 1)

Поскольку точность измерения величин $\delta^2\text{H}$ составляла $\pm 1\text{‰}$, то погрешность расчёта ΔT близка к расчётным величинам изменения ТПО для всех годовых слоёв, за исключением горизонтов 2011–2012 и 2021–2022 гг. Для этих годовых

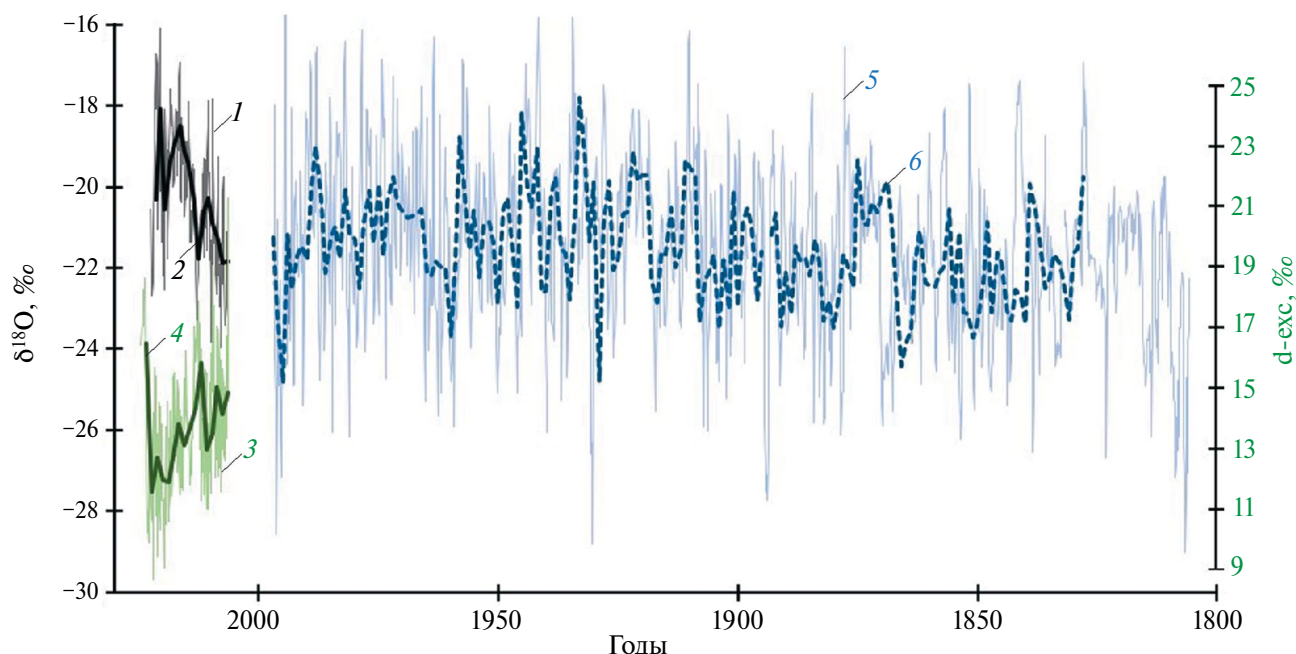


Рис. 4. Распределение полученных в 2022 г. значений $\delta^{18}\text{O}$ и d-excess ледниковом льду в кратере Горшкова относительно ранее установленных в керне К-2 (Shiraiwa, Yamaguchi, 2002): 1 – все значения $\delta^{18}\text{O}$, 2 – среднегодовые значения $\delta^{18}\text{O}$, 3 – все значения d-excess, 4 – среднегодовые значения d-excess, 5 – значения $\delta^{18}\text{O}$ в керне К-2, 6 – среднегодовые значения $\delta^{18}\text{O}$ в керне К-2

Fig. 4. Distribution of $\delta^{18}\text{O}$ and d-excess values obtained in 2022 for glacial ice in the Gorshkov crater relative to those previously established in the K-2 core (Shiraiwa, Yamaguchi, 2002): 1 – all $\delta^{18}\text{O}$ values, 2 – average annual $\delta^{18}\text{O}$ values, 3 – all values d-excess, 4 – average annual values of d-excess, 5 – $\delta^{18}\text{O}$ values in core K-2, 6 – average annual $\delta^{18}\text{O}$ values in core K-2

слоёв расчётное увеличение температуры поверхности воды составило 4.5 и 6.5 °C при погрешности расчёта ± 2.5 °C. Изменения температур могли быть связаны с сильной положительной аномалией температуры поверхности воды в северо-западном секторе Тихого океана. Действительно, по данным HadSST наблюдалась длительная устойчивая положительная аномалия температуры поверхности океана с октября 2021 г. по январь 2022 г. в северной части Тихого океана, а также с октября по декабрь 2011 г. В среднем за октябрь–декабрь 2021 гг. значение аномалии составило до 3 °C (относительно среднего за 1961–1990 гг.) в северной части Тихого океана и до 5 °C в Японском море (рис. 5, а). В октябре–декабре 2011 г. аномалия температуры была менее интенсивна (до +2...+2.5 °C) и занимала меньшую площадь (см. рис. 5, б), однако всё же среднее значение за 2006–2022 гг. было превышено более чем на 1 °C. Такой сильной и продолжительной аномалии температуры поверхности воды, как в 2021–2022 гг., в этом регионе не наблюдалось ни разу в холодные сезоны, начиная с 2006 г.

Основные траектории циклонов, приносящих осадки на Камчатку в холодное время года, различны в зависимости от положения полярного

фронта в конкретный месяц года. В середине зимы (январь) интенсивность и продолжительность циклонов, которые образуются к югу от Камчатки, падает (Schemm et al., 2021), а центр циклонов, образующихся в районе течения Куросио, сдвигается в сторону экватора. Основные траектории движения циклонов в регионе в октябре–марте 1998–2003 гг. имели преимущественно зональный характер – над океаном от Курильских островов в восточные районы Берингова моря. В начале XXI в. (2009–2015 гг.) преобладали меридиональные траектории из субтропиков – участились южные циклоны от Японских островов в Охотское море и западную часть Берингова моря, что может быть связано с ослаблением Алеутской депрессии и смещением её на запад (Glebova, 2018). Анализ среднего направления ветра на уровне 600 Гпа (около 4 км) по реанализу ERA5 за 2006–2022 гг. показывает, что над Камчаткой ведущий поток воздуха на этой высоте в период с октября по декабрь направлен с запада и юго-запада, а в январе–феврале уже характерен северо-восточный перенос с северных районов Тихого океана по периферии алеутской депрессии.

Таким образом, учитывая тенденции в изменении атмосферной циркуляции в сторону более

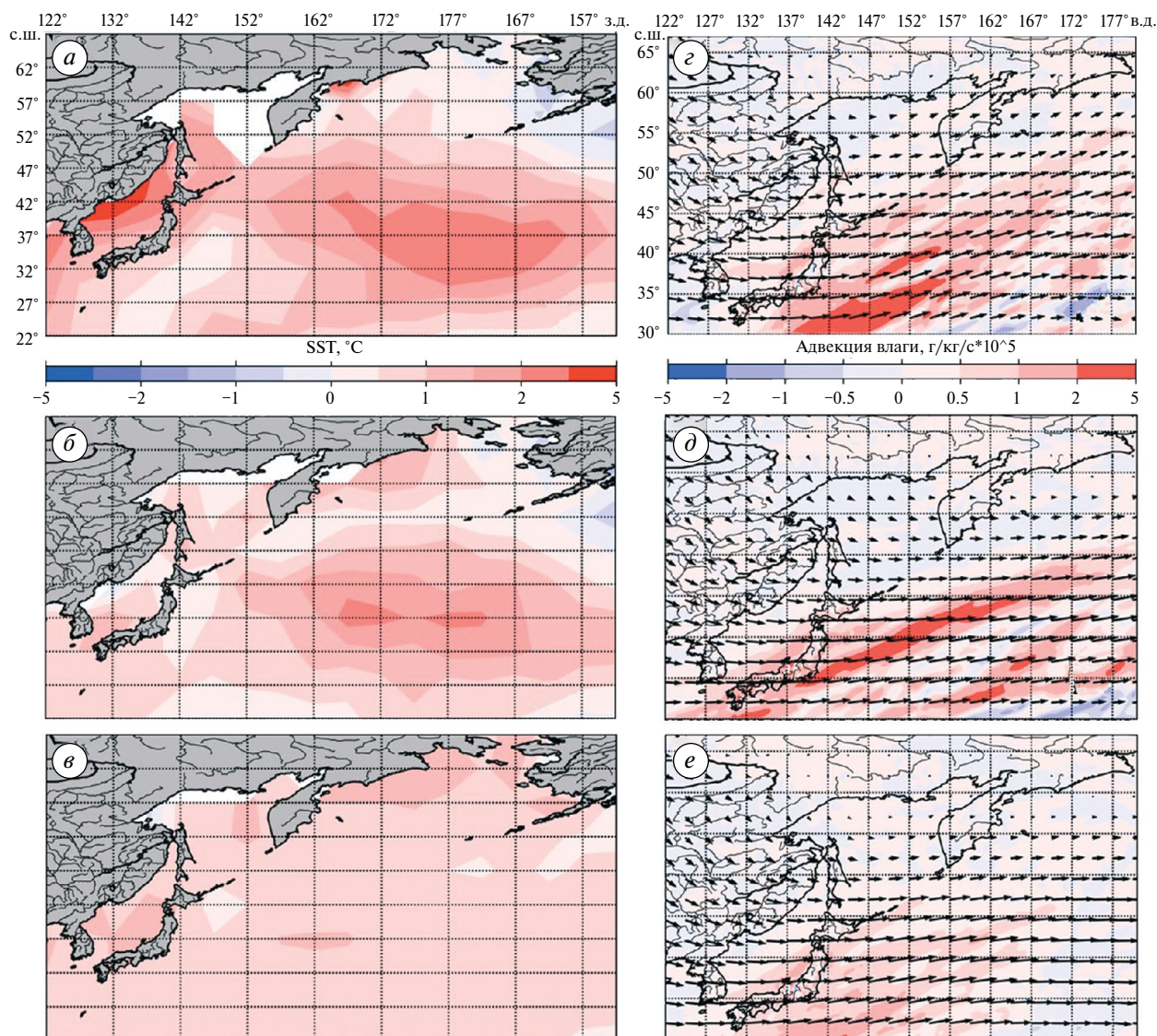


Рис. 5. Среднемесячная аномалия температуры поверхности воды относительно базового периода 1961–1990 гг. за октябрь–декабрь: 2021 г. (а); 2011 г. (б); 2006–2022 гг. (в); среднесуточная адвекция влаги Q ($\text{г/кг} \times \text{с}^{-1} \times 10^5$) (цветная заливка) и среднесуточное направление ветра (стрелки) на уровне 600 гПа по данным реанализа ERA5 в среднем за октябрь–декабрь 2021 г. (г); 2011 г. (д); 2006–2022 гг. (е)

Fig. 5. Average monthly anomaly of water surface temperature relative to the base period 1961–1990. for October–December: 2021 (a); 2011 (b); 2006–2022 (e); average daily moisture advection Q ($\text{g/kg} \times \text{s}^{-1} \times 10^5$) (color fill) and average daily wind direction (arrows) at 600 hPa according to ERA5 reanalysis data on average for October–December 2021 (g); 2011 г. (d); 2006–2022 (e)

меридиональной, в последнее десятилетие осенью и в начале зимы в акваторию Охотского моря и на Камчатку, по-видимому, более часто стали приходить воздушные массы из субтропиков, в частности из районов течения Куро시오. Распределение адвекции влаги показывает, что в 2011 и 2021 гг. значения Q были выше, чем в среднем за октябрь–декабрь 2013–2020 гг. (см. рис. 5, е). Максимумы адвекции влаги находятся к востоку от Японских островов — в 2021 г. в зоне 30–40° с.ш., в 2011 г.

область максимумов вытянута с юго-запада на северо-восток до 50° с.ш. В октябре–декабре 2021 г. для ведущего потока воздуха на уровне 4 км была характерна сильная юго-западная составляющая (см. рис. 5, г). Аномально тёплая морская поверхность в этих районах и, соответственно, более интенсивное испарение в регионе в 2011 и 2021 гг. могли способствовать поступлению на Камчатский полуостров влаги с более высокими значениями дейтериевого эксцесса, чем в другие сезоны.

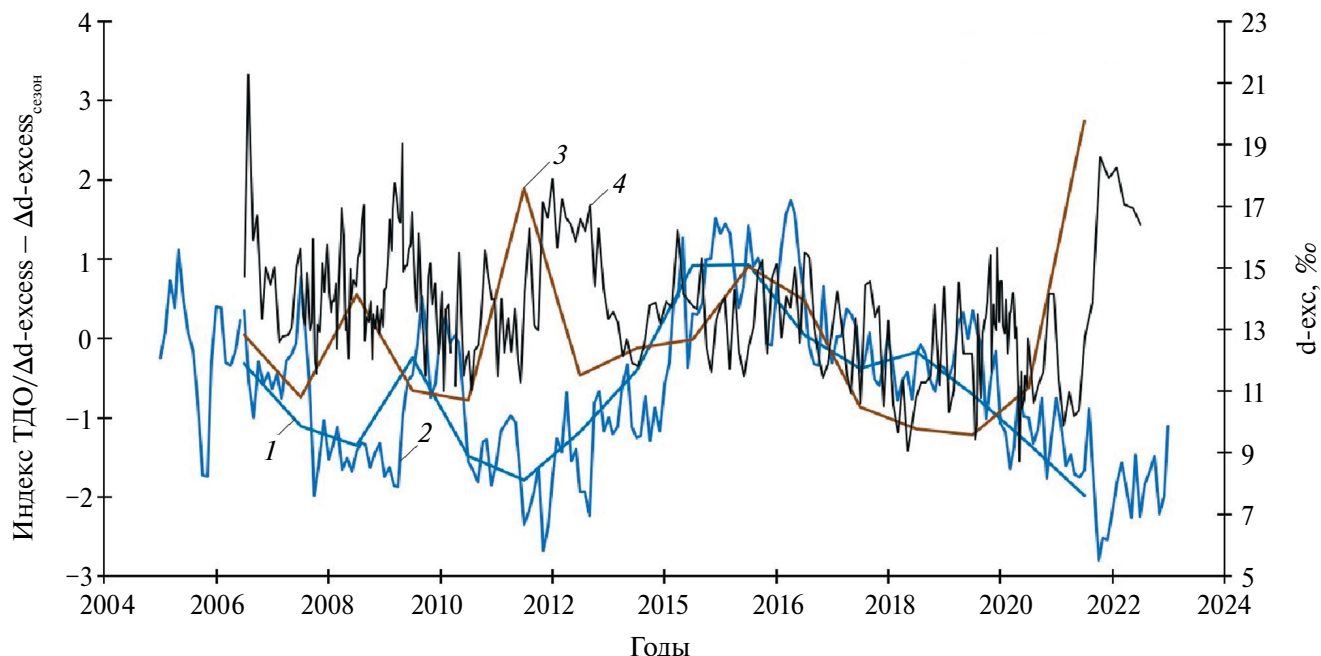


Рис. 6. Вариации индекса Тихоокеанского декадного колебания (ТДО) относительно дейтериевого эксцесса в керне 2022 г.: 1 – индексы ТДО среднегодовые, осредненные с июля по июль; 2 – индексы ТДО; 3 – несезонные колебания $d\text{-excess} = \Delta d\text{-excess} - \Delta d\text{-excess}_{\text{сезон}}$; 4 – величины $d\text{-excess}$ по всему керну

Fig. 6. Variations of the Pacific Decadal Oscillation (PDO) index relative to deuterium kurtosis in the 2022 core: 1 – PDO indices, averaged from July to July; 2 – annual average PDO indices; 3 – non-seasonal fluctuations $d\text{-excess} = \Delta d\text{-excess} - \Delta d\text{-excess}_{\text{season}}$; 4 – $d\text{-excess}$ values throughout the core

Сопоставление величины $d\text{-excess}$ льда керна 2022 г. с индексом Тихоокеанского декадного колебания (ТДО) показало, что в некоторых случаях отмечается выраженная обратная корреляция, которая также наиболее сильно проявляется для 2011–2012 и 2021–2022 гг. (рис. 6).

Тихоокеанское десятилетнее колебание является основной модой климатической изменчивости Тихого океана, наряду с Эль-Ниньо (ENSO – El Nino / Southern Oscillation). Фазы ТДО определяются сменой положения аномалий температуры поверхности океана во внутренней части севера Тихого океана и у Тихоокеанского побережья Северной Америки. Поэтому очевидно, что индексы ТДО должны быть связаны с величиной дейтериевого эксцесса атмосферных осадков Камчатки, источником которых служат внутренние районы севера Тихого океана. Между 2012 и 2018 гг. мы столкнулись со значительным усреднением изотопной записи в керне, что, скорее всего, связано с большим участием жидкой воды в формировании льда. Глобальные циркуляционные процессы в Тихом океане влияют на формирование изотопных параметров ледникового льда Камчатки. Однако эти эффекты слабо выражены на фоне преобладающей роли изменений в сезонном накоплении атмосферных осадков на леднике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получен новый неглубокий ледниковый керн в кратере Горшкова вулкана Ушковский; его общая глубина составила 14 м (10.5 м водного эквивалента), что соответствует 16 годам аккумуляции согласно вариациям $\delta^{18}\text{O}$ и химическому составу пепловых горизонтов.

Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ льда варьируют от -16 до -24‰ и от -110.5 до -177.7‰ при средних значениях -20.5 и -150.2‰ , соответственно. Величина дейтериевого эксцесса меняется по глубине от 8.7 до 21.3‰ при среднем значении 13.7‰ . Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ льда формируют линейный тренд, описываемый уравнением $\delta^2\text{H} = 7.47 \times \delta^{18}\text{O} + 2.9$ ($R^2 = 0.98$); наклон линии, отличный от глобальной линии метеорных вод, отражает смещение летних и зимних атмосферных осадков. Зимой воздушные массы, образовавшиеся над Японским морем и Тихим океаном в секторе $30\text{--}40^\circ$ с.ш. и $140\text{--}160^\circ$ в.д., приносят осадки с высокими величинами $d\text{-excess}$, что обусловлено низкой относительной влажностью в районе-источнике пара. Летом над большей частью акватория севера Тихого океана отмечается высокая относительная влажность, в результате водяной пар имеет низкие величины $d\text{-excess}$. Поэтому лёд, сформированный летними осадками, имеет высокие значения $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^2\text{H}$) на фоне низких

d-excess, а лёд зимнего сезона, наоборот, имеет низкие величины $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^2\text{H}$) и высокие d-excess.

Изменения величин $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ льда по глубине происходят в противофазе с изменениями d-excess, что отражает доминирующую роль пропорций накопления сезонных осадков в формировании изотопного сигнала ледникового льда. Отличия средних значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ льда нового керна от керна К-2, полученного в кратере вулкана Ушковский ранее, связаны с изменением структуры питания ледника — преобладанием осадков летнего (весеннего) сезона на фоне уменьшения осадков зимнего периода.

На изотопные параметры льда могут влиять изменения в источнике водяного пара, откуда воздушные массы приносят осадки на Камчатку. Условия в районе происхождения влаги играли заметную роль в формировании среднегодового значения d-excess годовых слоёв льда 2011/12 и 2021/22 гг. Расчёт по величине d-excess с учётом сезонности показал, что для этих лет характерна выраженная положительная аномалия температур поверхности моря. Это подтверждается данными наблюдений HadSST: длительная устойчивая положительная аномалия температуры поверхности океана в северо-западном секторе Тихого океана существовала с октября 2021 г. по январь 2022 г., а также с октября по декабрь 2011 г. В среднем за октябрь–декабрь 2021 г. значение аномалии составило до 3°C (относительно среднего за 1961–1990 гг.) в северной части Тихого океана и до 5°C в Японском море. Такой сильной и продолжительной аномалии температуры поверхности воды в этом регионе в другие сезоны не наблюдалось. Для 2011–2012 и 2021–2022 годовых слоёв льда в керне была отмечена обратная корреляция между индексом Тихоокеанского декадного колебания и величинами d-excess. Это означает, что глобальные циркуляционные процессы в Тихом океане находят своё отражение в изотопных ($\delta^{18}\text{O}$, d-excess) характеристиках ледникового льда.

Благодарности. Авторы благодарят П.А. Торопова за помощь в полевых работах и обсуждении результатов. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 22-17-00159. Анализ изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) льда проводился в рамках мегагранта (Соглашение № 075-15-2021-599 от 08.06.2021). Анализ климатической изменчивости в тихоокеанском регионе выполнен в рамках государственного задания Института географии РАН № FMGE-2019-0004.

Acknowledgments. We thank P.A. Toropov for assistance in field work and discussion of the results. The work was carried out with financial support from the Russian Science Foundation grant 22-17-00159. Analysis of the isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) of ice was carried out within the framework of the Megagrant

(Agreement No. 075-15-2021-599 dated 06/08/2021). The analysis of climatic variability in the Pacific region was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences No. FMGE-2019-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Горбач Н.В., Филофова Т.М., Михаленко В.Н. Идентификация горизонтов тейфы в леднике на вершине вулкана Ушковский (Камчатка) // Лёд и Снег. 2024. Т. 64. № 1. С. 66–80.
- Craig H., Gordon L.I. Deuterium and oxygen 18 variations in the ocean and the marine atmosphere, in: Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures, edited by Tongiorgi E. Lab. Geol. Nucl., Pisa, Italy. 1965. P. 9–130.
- Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus B. 1964. V. 16. P. 436–468.
- Dansgaard W., Johnsen S.J., Clausen H.B., Dahl-Jensen D., Gundestrup N.S., Hammer C.U., Hvidberg C.S., Steffensen J.P., Sveinbjörnsdóttir A.E., Jouzel J., Bond G. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record // Nature. 1993. Vol. 364. P. 218–220.
- Fisher D.A., Wake C., Kreutz K., Yalcin K., Steig E., Mayewski P., Anderson L., Zheng J., Rupper S., Zdanowicz C., Demuth M., Waszkiewicz M., Dahl-Jensen D., Goto-Azuma K., Bourgeois J.B., Koerner R.M., Sekerka J., Osterberg E., Abbott M.B., Finney B.P., Burns S.J. Stable Isotope Records from Mount Logan, Eclipse Ice Cores and Nearby Jellybean Lake. Water Cycle of the North Pacific Over 2000 Years and Over Five Vertical Kilometres: Sudden Shifts and Tropical Connections // Géographie physique et Quaternaire. 2004. V. 58. N. 2–3. P. 337–352.
- Gat J.R. Atmospheric water balance — the isotopic perspective // Hydrological Processes. 2000. V. 14. P. 1357–1369.
- Glebova S.Yu. Cyclones over the Pacific Ocean and Far-Eastern Seas in cold and warm seasons and their influence on wind and thermal regime in the last two decade period // Izv. TINRO. 2018. V. 193. P. 153–166.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journ. Meteorol. Soc. 2020. V. 146. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Jouzel J., Merlivat L., Lorius C. Deuterium excess in an East Antarctic ice core suggests higher relative humidity at the oceanic surface during the last glacial maximum // Nature. 1982. V. 299. P. 688–691.
- Jouzel J., Lorius C., Petit J.R., Genthon C., Barkov N.I., Kotlyakov V.M., Petrov V.M. Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000 years) // Nature. 1987. V. 329. P. 403–408.

- Jouzel J., Masson-Delmotte V., Cattani O., Dreyfus G., Falourd S., Hoffmann G., Minster B., Nouet J., Barnola J.M., Chappellaz J., Fischer H., Gallet J.C., Johnsen S., Leuenberger M., Loulergue L., Luthi D., Oerter H., Parrenin F., Raisbeck G., Raynaud D., Schilt A., Schwander J., Selmo E., Souchez R., Spahni R., Stauffer B., Steffensen J.P., Stenni B., Stocker T.F., Tison J.L., Werner M., Wolff E.W. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the last 800.000 years // *Science*. 2007. V. 317. P. 793–796.
- Kang S., Zhang Y., Zhang Y., Grigholm B., Kaspari S., Qin D., Ren J., Mayewski P. Variability of atmospheric dust loading over the central Tibetan Plateau based on ice core glaciochemistry // *Atmos. Environ.* 2010. V. 44. P. 2980–2989.
- Kennedy J.J., Rayner N.A., Atkinson C.P., Killick R.E. An ensemble data set of sea surface temperature change from 1850: the Met Office Hadley Centre HadSST.4.0.0.0. data set // *Journ. of Geophysical Research: Atmospheres*. 2019. V. 124. <https://doi.org/10.1029/2018JD029867>
- Korneva I.A., Toropov P.A., Muraviev A.Y., Aleshina M.A. Climatic factors affecting Kamchatka glacier recession // *International Journ. of Climatology*. 2024. V. 44. № 2. P. 345–369.
- Kurita N. Origin of Arctic vapor during the ice-growth season // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L02709. <https://doi.org/10.1029/2010GL046064>.
- Merlivat L., Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation // *Journ. of Geophysical Research*. 1979. V. 84 (C8). P. 5029–5033.
- Pfahl S., Sodemann H. What controls deuterium excess in global precipitation? // *Climate of the Past*. 2014. V. 10. P. 771–781.
- Sato T., Shiraiwa T., Greve R., Seddik H., Edelmann E., Zwinger T. Accumulation reconstruction and water isotope analysis for 1735–1997 of an ice core from the Ushkovsky volcano, Kamchatka, and their relationships to North Pacific climate records // *Climate of the Past Discussion*. 2013. V. 9. P. 2153–2181.
- Schemm S., Wernli H., Binder H. The storm-track suppression over the western North Pacific from a cyclone life-cycle perspective // *Weather Clim. Dynam.* 2021. V. 2. P. 55–69.
- Shiraiwa T., Yamaguchi S. Reconstruction of Glacier Mass Balances and Climate Changes in the Kamchatka Peninsula // *Journ. of Geography*. 2002. V. 111. № 4. P. 476–485.
- Shiraiwa Y., Murav'yev Y.D., Kameda T., Nishio F., Tomaya Y., Takahashi A., Ovsianikov A.A., Salamatina A.N., Yamagata K. Characteristics of a crater glacier at Ushkovsky volcano, Kamchatka, Russia, as revealed by the physical properties of ice cores and borehole thermometry // *Journ. of Glaciol.* 2001. V. 47 (158). P. 423–432.
- Souchez R., Jouzel J. On the isotopic composition in δD and $\delta^{18}O$ of water and ice during freezing // *Journ. of Glaciology*. 1984. V. 30. N. 106. P. 369–372.
- Thompson L.G., Yao T., Davi M.E., Mosley-Thompson, E., Wu G., Porter S.E., Xu B., Lin P.-N., Wang N., Beaudon E., Duan K., Sierra-Hernández M.R., Kenny D.V. Ice core records of climate variability on the Third Pole with emphasis on the Guliya ice cap, western Kunlun Mountains // *Quat. Sci. Rev.* 2018. V. 188. P. 1–14.
- Tian L., Yao T., Li Z., MacClune K., Wu G., Xu B. Recent rapid warming trend revealed from the isotopic record in Muztagata ice core, eastern Pamirs // *Journ. of Geophysical Research*. 2006. V. 111. D13103.
- Uemura R., Masson-Delmotte V., Jouzel J., Landais A., Motoyama, H., Stenni B. Ranges of moisture-source temperature estimated from Antarctic ice cores stable isotope records over glacial–interglacial cycles // *Climate of the Past*. 2012. V. 8. P. 1109–1125.
- Yoshimura K., Ichiyangi K. A reconsideration of Seasonal Variation in Precipitation Deuterium Excess Over East Asia // *Journ. Japan Soc. Hydrol. and Water Resour.* 2009. V. 22. No. 4. P. 262–276.
- Yu W., Yao T., Thompson L., Jouzel J., Zhao H., Xu B., Jing Zh., Wang N., Wu G., Ma Y., Gao J., Yang X., Zhang J., Qu D. Temperature signals of ice core and speleothem isotopic records from Asian monsoon region as indicated by precipitation $\delta^{18}O$ // *Earth and Planetary Science Letters*. 2021. 554. 116665. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116665>.

Citation: Chizhova Yu.N., Mikhaleiko V.N., Korneva I.A., Muravyev Ya.D., Hayredinova A.G., Vorobiev M.A. Isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) of glacial ice in Kamchatka: relation with modern climate changes in the Pacific Region. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (3): 373–386. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673424030053

Isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) of glacial ice in Kamchatka: relation with modern climate changes in the Pacific Region

Yu. N. Chizhova^{a,b,*}, V. N. Mikhaleiko^b, I. A. Korneva^{b,c},
Ya. D. Muravyov^d, A. G. Hayredinova^b, M. A. Vorobiev^b

^aInstitute of Geology of Ore Deposits, Petrology, Mineralogy and Geochemistry (IGEM) RAS, Moscow, Russia

^bInstitute of Geography RAS, Moscow, Russia

^cInstitute of Natural-Technical Systems, Sevastopol, Russia

^dInstitute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

*e-mail: eacentr@yandex.ru

Received May 2, 2024 / Revised June 6, 2024 / Accepted July 8, 2024

The isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) of ice sampled during core drilling of a glacier in the crater of the Ushkovsky volcano in the summer of 2022 (new core) was studied. The ice core 14 m long dates from 2006 to 2022 and covers 16 years of accumulation. The values of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ of the ice vary from -16 to -24‰ and from -110.5 to -177.7‰ at average values of -20.5 and -150.2‰ , respectively. The deuterium excess varies in depth from 8.7 to 21.3‰ at an average value of 13.7‰ . In the isotope diagram, the values of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ form a linear trend described by the equation $\delta^2\text{H} = 7.47 \times \delta^{18}\text{O} + 2.9$ ($R^2 = 0.98$), the slope of the line, different from the global meteoric water line, reflects the mixing of summer and winter precipitation. Ice formed by summer precipitation has high values of $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^2\text{H}$) against a background of low d-excess, while ice of the winter season, on the contrary, has low values of $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^2\text{H}$) and high d-excess. Changes in the values of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ of ice in depth proceed in antiphase with changes in d-excess, which reflects the dominant role of seasonal accumulation in the formation of the isotope record. The differences in the average values of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ of the ice from the new core and similar values of ice from the core previously taken in the same crater of the Ushkovsky volcano are due to a change in the structure of the glacier's alimentation – an increase in the amount of precipitation in the summer-spring season and a decrease in precipitation in the winter period. In addition to changes in the proportion of accumulation of the seasonal precipitation, the isotopic composition of ice is influenced by changes in the source of water vapor, from where air masses bring precipitation to Kamchatka. The use of the d-excess value allowed us to establish that the isotopic parameters of the ice of 2011–2012 and 2021–2022 annual layers were influenced by a pronounced positive anomaly in ocean surface temperatures, which is confirmed by HadSST observations. Thus, the isotopic parameters of glacial ice may serve as an indicator of climate change in the Pacific region.

Keywords: Kamchatka, glacial ice, oxygen isotope composition, deuterium excess, sea surface temperature anomalies, Pacific region

REFERENCES

- Gorbach N.V., Filosofova T.M., Mikhaleiko V.N. Identification of sources of ash buried in a glacier at the top of the Ushkovsky volcano (Kamchatka) using analysis of the chemical composition of volcanic glass. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024. 64 (1): 68–60. [In Russian].
- Craig H., Gordon L.I. Deuterium and oxygen 18 variations in the ocean and the marine atmosphere, in: *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*, edited by Tongiorgi E. Lab. Geol. Nucl., Pisa, Italy. 1965: 9–130.
- Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus B*. 1964, 16: 436–468.
- Dansgaard W., Johnsen S.J., Clausen H.B., Dahl-Jensen D., Gundestrup N.S., Hammer C.U., Hvidberg C.S., Steffensen J.P., Sveinbjörnsdottir A.E., Jouzel J., Bond G. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*. 1993, 364: 218–220.
- Fisher D. A., Wake C., Kreutz K., Yalcin K., Steig E., Mayewski P., Anderson L., Zheng J., Rupper S., Zdanowicz C., Demuth M., Waszkiewicz M., Dahl-Jensen D., Goto-Azuma K., Bourgeois J.B., Koerner R.M., Sekerka J., Osterberg E., Abbott M.B.,

- Finney B.P., Burns S.J. Stable Isotope Records from Mount Logan, Eclipse Ice Cores and Nearby Jellybean Lake. Water Cycle of the North Pacific Over 2000 Years and Over Five Vertical Kilometres: Sudden Shifts and Tropical Connections. *Géographie physique et Quaternaire*. 2004, 58 (2–3): 337–352.
- Gat J.R. Atmospheric water balance – the isotopic perspective. *Hydrological Processes*. 2000, 14: 1357–1369.
- Glebova S.Yu. Cyclones over the Pacific Ocean and Far-Eastern Seas in cold and warm seasons and their influence on wind and thermal regime in the last two decade period. *Izv. TINRO*. 2018, 193: 153–166.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journ. Meteorol. Soc.* 2020, 146: 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Jouzel J., Merlivat L., Lorius C. Deuterium excess in an East Antarctic ice core suggests higher relative humidity at the oceanic surface during the last glacial maximum. *Nature*. 1982, 299: 688–691.
- Jouzel J., Lorius C., Petit J.R., Genthon C., Barkov N.I., Kotlyakov V.M., Petrov V.M. Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160.000 years). *Nature*. 1987, 329: 403–408.
- Jouzel J., Masson-Delmotte V., Cattani O., Dreyfus G., Falourd S., Hoffmann G., Minster B., Nouet J., Barnola J.M., Chappellaz J., Fischer H., Gallet J.C., Johnsen S., Leuenberger M., Loulergue L., Luthi D., Oerter H., Parrenin F., Raisbeck G., Raynaud D., Schilt A., Schwander J., Selmo E., Souchez R., Spahni R., Stauffer B., Steffensen J.P., Stenni B., Stocker T.F., Tison J.L., Werner M., Wolff E.W. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the last 800.000 years. *Science*. 2007, 317: 793–796.
- Kang S., Zhang Y., Zhang Y., Grigholm B., Kaspari S., Qin D., Ren J., Mayewski P. Variability of atmospheric dust loading over the central Tibetan Plateau based on ice core glaciochemistry // *Atmos. Environ.* 2010, 44: 2980–2989.
- Kennedy J.J., Rayner N.A., Atkinson C.P., Killick R.E. An ensemble data set of sea surface temperature change from 1850: the Met Office Hadley Centre HadSST.4.0.0.0. data set. *Journ. of Geophysical Research: Atmospheres*. 2019, 124. <https://doi.org/10.1029/2018JD029867>
- Korneva I.A., Toropov P.A., Muraviev A.Y., Aleshina M.A. Climatic factors affecting Kamchatka glacier recession. *International Journ. of Climatology*. 2024, 44: 345–369.
- Kurita N. Origin of Arctic vapor during the ice-growth season. *Geophys. Res. Lett.* 2011, 38. L02709. <https://doi.org/10.1029/2010GL046064>.
- Merlivat L., Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation. *Journ. of Geophysical Research*. 1979, 84 (C8): 5029–5033.
- Pfahl S., Sodemann H. What controls deuterium excess in global precipitation? *Climate of the Past*. 2014, 10: 771–781.
- Sato T., Shiraiwa T., Greve R., Seddik H., Edelmann E., Zwinger T. Accumulation reconstruction and water isotope analysis for 1735–1997 of an ice core from the Ushkovsky volcano, Kamchatka, and their relationships to North Pacific climate records. *Climate of the Past Discussion*. 2013, 9: 2153–2181.
- Schemm S., Wernli H., Binder H. The storm-track suppression over the western North Pacific from a cyclone life-cycle perspective. *Weather Clim. Dynam.* 2021, 2: 55–69.
- Shiraiwa T., Yamaguchi S. Reconstruction of Glacier Mass Balances and Climate Changes in the Kamchatka Peninsula. *Journ. of Geography*. 2002, 111 (4): 476–485.
- Shiraiwa Y., Murav'yev Y.D., Kameda T., Nishio F., Tomaya Y., Takahashi A., Ovsiannikov A.A., Salamatina A.N., Yamagata K. Characteristics of a crater glacier at Ushkovsky volcano, Kamchatka, Russia, as revealed by the physical properties of ice cores and borehole thermometry. *Journ. of Glaciol.* 2001, 47 (158): 423–432.
- Souchez R., Jouzel J. On the isotopic composition in δD and $\delta^{18}O$ of water and ice during freezing. *Journ. of Glaciology*. 1984, 30 (106): 369–372.
- Thompson L.G., Yao T., Davi M.E., Mosley-Thompson, E., Wu G., Porter S.E., Xu B., Lin P.-N., Wang N., Beaudon E., Duan K., Sierra-Hernández M.R., Kenny D.V. Ice core records of climate variability on the Third Pole with emphasis on the Guliya ice cap, western Kunlun Mountains. *Quat. Sci. Rev.* 2018, 188: 1–14.
- Tian L., Yao T., Li Z., MacClune K., Wu G., Xu B. Recent rapid warming trend revealed from the isotopic record in Muztagata ice core, eastern Pamirs. *Journ. of Geophysical Research*. 2006, 111: D13103.
- Uemura R., Masson-Delmotte V., Jouzel J., Landais A., Motoyama, H., Stenni B. Ranges of moisture-source temperature estimated from Antarctic ice cores stable isotope records over glacial–interglacial cycles. *Climate of the Past*. 2012, 8: 1109–1125.
- Yoshimura K., Ichiyanagi K. A reconsideration of Seasonal Variation in Precipitation Deuterium Excess Over East Asia. *Journ. Japan Soc. Hydrol. and Water Resour.* 2009, 22 (4): 262–276.
- Yu W., Yao T., Thompson L., Jouzel J., Zhao H., Xu B., Jing Zh., Wang N., Wu G., Ma Y., Gao J., Yang X., Zhang J., Qu D. Temperature signals of ice core and speleothem isotopic records from Asian monsoon region as indicated by precipitation $\delta^{18}O$. *Earth and Planetary Science Letters*. 2021, 554: 116665. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116665>