

УДК 551.583.2

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ВЕЛИЧИНЕ ДЕЙТЕРИЕВОГО ЭКСЦЕССА В ЛЕДНИКОВОМ ЛЬДУ КАМЧАТКИ

© 2024 г. Ю. Н. Чижова^{1,2,*}, В. Н. Михаленко², И. А. Корнева², Я. Д. Муравьев³,
А. Г. Хайрединова², М. А. Воробьев²

Представлено академиком РАН В.М. Котляковым 18.03.2024 г.

Поступило 18.03.2024 г.

После доработки 08.04.2024 г.

Принята к публикации 15.04.2024 г.

Исследованы изотопные характеристики ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, d-excess) льда вулкана Ушковский на Камчатке. Новый неглубокий керн был получен в 2022 г. в кратере Горшкова. Ледниковый керн длиной 14 м был датирован подсчётом годовых слоёв, которые также сопоставлялись с известными извержениями последних лет. Верхние 14 м ледника были образованы за последние 16 лет (с 2006 по 2022 г.). 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‰ . Для зимних горизонтов при низких значениях $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ отмечается увеличение d-excess. Это связано с происхождением влаги, приносимой на Камчатку. Источником влаги являются Тихий океан, Охотское и Японское моря, для которых существуют выраженные различия в условиях испарения влаги между летом и зимой. Тренды увеличения значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ от 2006 к 2022 г. сопровождается уменьшением дейтериевого эксцесса, указывая на увеличение доли летних атмосферных осадков. Однако, помимо изменений в сезонных пропорциях накопления осадков, величины d-excess льда могут отражать климатические изменения в источнике влаги.

Ключевые слова: Камчатка, ледниковый лёд, изотопный состав кислорода, дейтериевый эксцесс

DOI: 10.31857/S2686739724080173

ВВЕДЕНИЕ

Ледниковые керны являются архивом гидрохимического состава атмосферы, а изотопные параметры льда содержат информацию об условиях выпадения атмосферных осадков влаги, в первую очередь о температуре конденсации [1], об источнике атмосферной влаги и истории её поступления к леднику [2]. В северной части Тихого океана есть несколько ледниковых регионов, которые могут быть использованы для реконструкции палеоклимата по ледяным кернам. Одним из них является оледенение Ключевской группы вулканов на Камчатке, где в кратере вулкана Ушковский ранее был получен ледяной

керн К-2, для которого были опубликованы изотопно-кислородные данные [3] и отдельно изотопный состав водорода льда [4]. Распределение величины дейтериевого эксцесса во льду до настоящего времени не рассматривалось. Этот параметр ($\text{d-excess} = \delta^2\text{H} - 8 \times \delta^{18}\text{O} - [1]$) используется в гляциологических исследованиях как показатель происхождения атмосферных осадков и маркер пост-депозиционных изменений в тоще снега и фирна [5].

В настоящей работе рассматриваются новые изотопные данные по ледниковому льду, полученному керновым бурением в кальдере вулкана Ушковский в 2022 г. Основной целью данной работы является рассмотрение вариаций дейтериевого эксцесса, а также установление изменений, произошедших со времени последнего опробования этого ледника.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вулкан Ушковский (56.04° с.ш., 160.28° в.д.) расположен в центральной части Камчатского

¹Институт геологии рудных месторождений, петрологии, минералогии и геохимии Российской Академии наук, Москва, Россия

²Институт географии Российской Академии наук, Москва, Россия

³Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Петропавловск-Камчатский, Россия

*E-mail: eacentr@yandex.ru

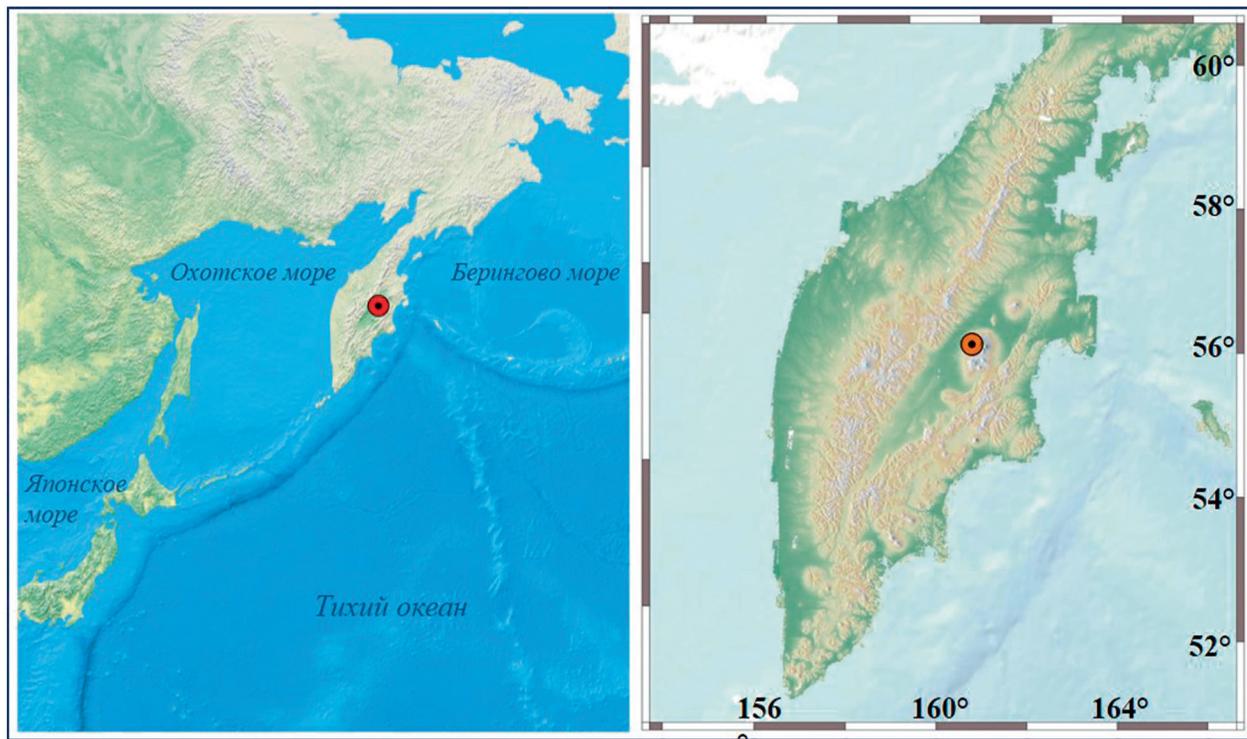


Рис. 1. Район исследования.

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 [4]. Снежно-фирновая толща сложно-стратифицированная и представляет собой частое переслаивание фирна и льда. Такая стратификация связана с большим количеством жидких осадков, замерзающих в порах фирна при значительном зимнем выхолаживании поверхности, и отмечалась ранее для ледникового льда вулканов Ушковский и Ичинский [6–8].

Бурение ледника в кратере Горшкова на высоте 3950 м (56,074 с.ш., 160,467° в.д.) было выполнено в сентябре 2022 г. при помощи установки GeoTech. Был получен керн льда длиной 14 м, который доставлялся в Москву в замороженном состоянии. Первичная пробоподготовка проходила в условиях морозильной камеры при температуре -20°C . Для получения максимально детализированной информации керн был нарезан на образцы с дискретностью 5 см. Фирновая часть керна очищалась керамическим ножом от внешних загрязнений в условиях морозильной камеры. Лед проходил трёхстадийное промывание в ультрачистой воде в лабораторных условиях.

Для образцов, отобранных с шагом 5 см из ледяного керна (274 образца), был выполнен изотопный анализ на анализаторе Picarro 2130-i. Для калибровки значений в каждой серии измерений, состоящей из 20 образцов, анализировались международные и лабораторные стандарты (USGS-45, USGS-46, USGS-47, Vos-4, СП и СПВ). Измеренные значения нормализовались методом линейной регрессии по множеству точек. Точность измерений составила 0.14‰ для значений $\delta^{18}\text{O}$ и 1‰ для значений $\delta^2\text{H}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Значения $\delta^{18}\text{O}$ льда варьируют от -16 до -24‰ при среднем значении -20.5‰ , значения $\delta^2\text{H}$ от -110.5 до -177.7‰ , среднее по всему керну составило -150.2‰ . Величина дейтериевого эксцесса меняется по глубине от 8.7 до 21.3‰ при среднем значении 13.7‰ (рис. 2). В распределении значений $\delta^{18}\text{O}$ по глубине заметны сезонные вариации: для летних горизонтов характерны наибольшие значения $\delta^{18}\text{O}$ от -16 до -18‰ , между летними максимумами лёд в среднем характеризуется величинами $\delta^{18}\text{O}$ от -19 до -24‰ , и, видимо, относится к зимним горизонтам. Для значений d-excess также отмечается сезонность:

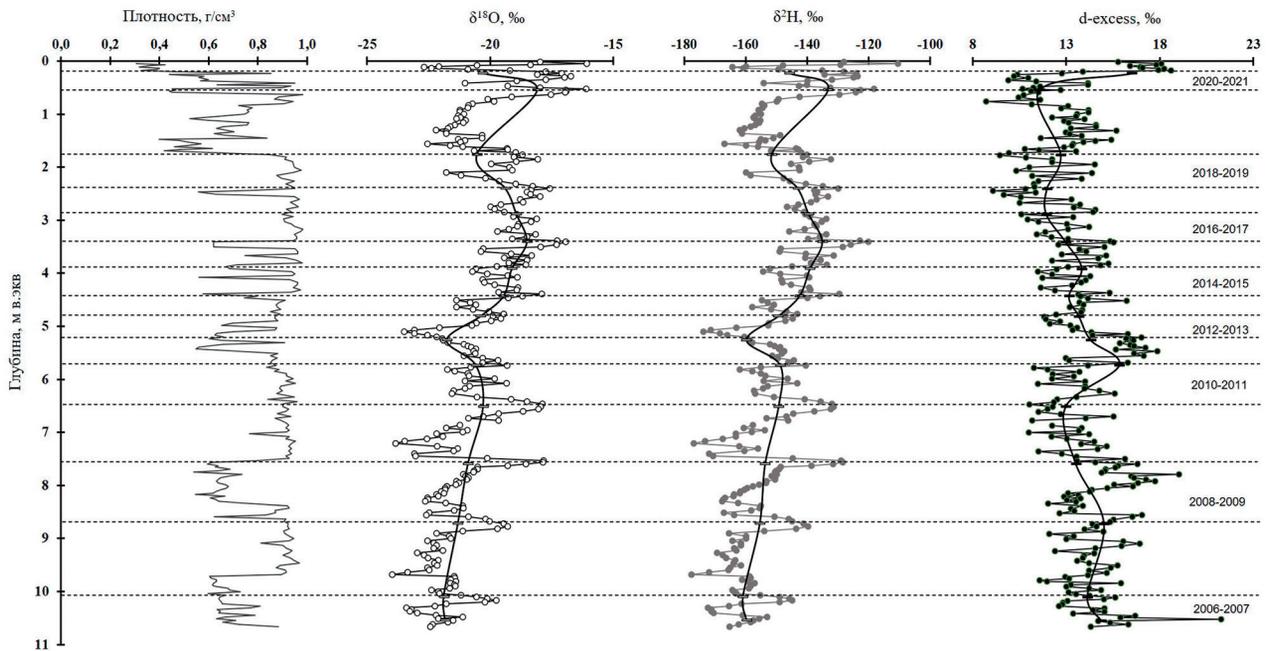


Рис. 2. Распределение плотности, значений $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d-excess льда по глубине в керне Ушковский. Жирной чёрной линией показаны осреднённые годовые значения, границы годовых слоёв — пунктирной линией.

порядка 12...16‰ (и выше) для зимних и около 9...12‰ для летних слоёв.

По вариациям $\delta^{18}\text{O}$ с учётом датированных пепловых горизонтов [9] мы выделили в керне 16 годовых слоёв. За границу года принималась середина летнего периода, которая хорошо заметна по положительным пикам значений $\delta^{18}\text{O}$. Выделить внутри годового слоя зимние и летние горизонты не представляется возможным. Высокая плотность льда (рис. 2 а) говорит об участии жидких осадков в формировании ледникового льда, т.е. в условиях морского типа климата общая закономерность формирования изотопной записи ледникового льда нарушается. Кроме того, в условиях поступления в атмосферу Камчатки большого количества вулканических газов, невозможно использовать дополнительные химические маркеры.

Низким значениям $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ льда соответствуют высокие значения d-excess — это характерно для осадков зимнего периода. Зимой закономерное падение температуры воздуха, как в районе выпадения осадков, так и в источнике влаги, приводит к понижению значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ выпадающих атмосферных осадков. Повышение значений d-excess связано с тем, что зимой над поверхностью Японского моря и Тихого океана в секторе 30–40° с.ш. и 140–160° в.д. формируются условия низкой относительной влажности воздуха, поэтому испаряющийся

в этих районах водяной пар, при поступлении на Камчатку продуцирует атмосферные осадки с высокими d-excess. Поступление водяного пара зимой с высокими d-excess из секторов Тихого океана и из Японского моря, было отмечено для Японии, Корейского полуострова и восточного Китая [10]. Расчёты, выполненные в работе [11], также показывают, что Японское море и Тихий океан к востоку от Японии в зимний период являются основным источником водяного пара с высокими величинами d-excess. В более восточных районах Тихого океана 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. Летние осадки почти всегда имеют низкие величины d-excess на фоне более высоких значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$.

На изотопной диаграмме 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 а). Величина наклона и свободного члена в этом уравнении отличается от глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ), что связано с сезонными различиями изотопных параметров осадков, и полученная линия регрессии отражает процессы смешения осадков зимнего и летнего сезонов.

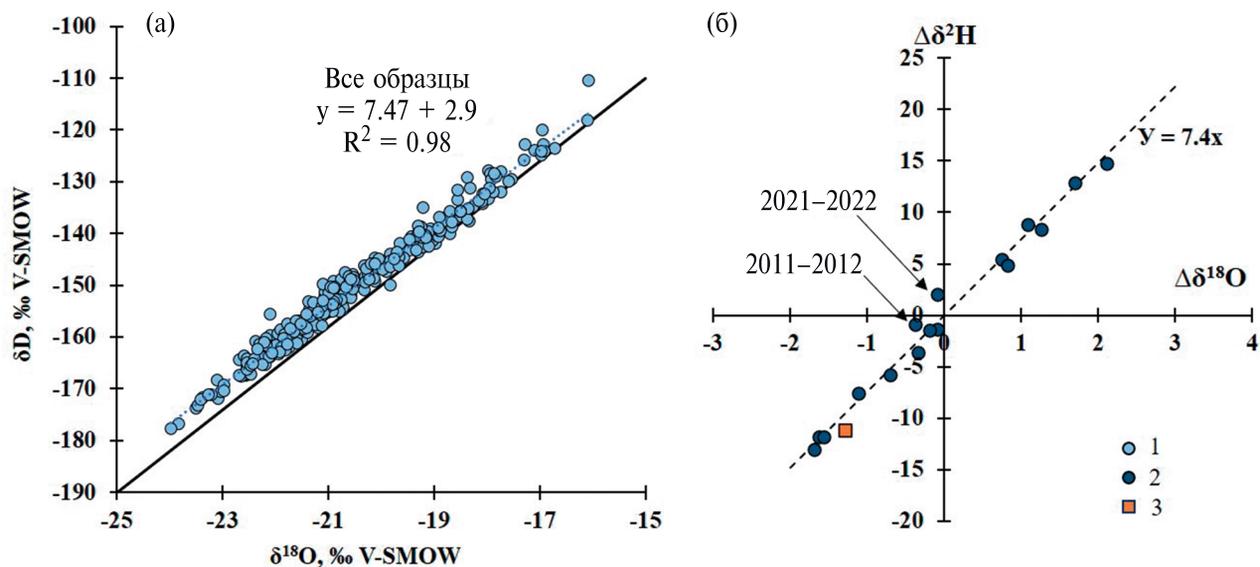


Рис. 3. Соотношение $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ для всех образцов льда (а) и отклонение осреднённых значений каждого годового слоя от среднемноголетнего по керну (б): 1 – значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ образцов льда, отобранных с шагом 5 см, 2 – осреднённые среднегодовые значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, 3 – среднее значение по керну К-2 согласно [3, 4].

Расчитанные нами среднегодовые значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ варьируют от -18.09 до -21.89‰ и от -133.17 до -161‰ (табл. 1), в их распределении по глубине заметен тренд повышения от 2006 к 2022 г. Аппроксимация этого тренда линейным уравнением (рис. 4) даёт общее возрастание величины $\delta^{18}\text{O}$ на 2.5‰ . Для этого же периода средние за год температуры воздуха (за год принимался период с июля по следующий июнь включительно в соответствии с расчётом значений $\delta^{18}\text{O}$ годовых слоёв) также демонстрируют положительный тренд. Аппроксимация тренда линейным уравнением (рис. 4) даёт общее возрастание температуры воздуха на 1.1°C . Согласно В. Дансгору изотопный состав кислорода атмосферных осадков в глобальном масштабе линейно связан со среднегодовой температурой воздуха $\delta^{18}\text{O} = 0.7 \times T_{\text{ср.год}}$ [1]. Это означает, что при увеличении среднегодовых температур на 1.1°C значения $\delta^{18}\text{O}$ должны были возрасти не более чем на 0.77‰ , а не на 2.5‰ . Следовательно, причиной возрастания значений $\delta^{18}\text{O}$ ледникового льда являлось не повышение температур воздуха. Кроме того, заметно, что в отдельные годы вариации $T_{\text{ср.год}}$ и $\delta^{18}\text{O}$ находятся в противофазе, и в целом не коррелируют ($r^2 = 0.2$).

Важно, что на фоне повышения значений $\delta^{18}\text{O}$ происходит одновременное уменьшение d-excess (см. рис. 2), эти величины по глубине изменяются в противофазе ($r^2 = -0.6$). Значения d-excess не связаны с температурными

условиями в районе выпадения осадков, поскольку конденсация в целом является равновесным процессом, а отражают разное происхождение летних и зимних осадков. Среднее многолетнее значение $\delta^{18}\text{O} = -20.21\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -147.96\text{‰}$, значения каждого отдельного года отклоняются от него в большую или меньшую сторону, но это отклонение также происходит вдоль линии с наклоном 7.4 (рис. 3 б), что соответствует линии смещения и в целом подтверждает доминирующую роль изменения доли летних и зимних осадков в формировании льда.

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 XIX в. составили $-22 \pm 1\text{‰}$ и повысились в 20 в до -21.2‰ [3], 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 гг. приводятся в работе [4], среднее значение по всему керну составило -160.1‰ . Относительно этого значения отмечаются участки повышения и понижения среднегодовых значений $\delta^2\text{H}$ как, например, для периода с 1736 по 1880 гг. средняя величина $\delta^2\text{H}$, осреднённая за 20 лет, составляла -156.1‰ , а для периода с 1910 по 1997 гг. $\delta^2\text{H} = -162.1\text{‰}$ [4]. На основе этих данных были сделаны предположения, что изотопная запись по Камчатским ледникам отражает

Таблица 1. Среднегодовые значения $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d-excess льда

Период осреднения	Глубина границы годового слоя, м.в.э.	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	d-excess
с 07.2006 по 07.2007	10.55	-21.83	-159.8	14.86
с 07.2007 по 07.2008	10.10	-21.89	-161.0	14.12
с 07.2008 по 07.2009	8.73	-21.31	-155.5	15.01
с 07.2009 по 07.2010	7.59	-20.90	-153.7	13.51
с 07.2010 по 07.2011	6.51	-20.29	-149.3	12.96
с 07.2011 по 07.2012	5.74	-20.58	-148.8	15.83
с 07.2012 по 07.2013	5.26	-21.76	-159.8	14.31
с 07.2013 по 07.2014	4.81	-20.39	-149.4	13.68
с 07.2014 по 07.2015	4.43	-19.45	-142.5	13.14
с 07.2015 по 07.2016	3.92	-19.12	-139.1	13.83
с 07.2016 по 07.2017	3.41	-18.51	-135.1	12.97
с 07.2017 по 07.2018	2.89	-18.94	-139.6	11.93
с 07.2018 по 07.2019	2.41	-19.38	-143.1	11.96
с 07.2019 по 07.2020	1.77	-20.54	-151.6	12.70
с 07.2020 по 07.2021	0.54	-18.09	-133.2	11.58
с 07.2021 по 07.2022	0.23	-20.30	-145.9	16.49
Среднее		-20.21	-147.96	13.68

климатические колебания, произошедшие за последние 300 лет. Выводы, приведённые в работах [3, 4], опираются на среднегодовые и многолетние тренды значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, в обеих работах отмечается повышение среднегодовых значений на границе 19–20 веков как отражение увеличений температур воздуха. Однако, связь этих значений с климатическими и циркуляционными изменениями в регионе остаётся пока ещё не до конца изученной.

Осреднённые значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, полученные в керне К-2, соответствуют линии смещения (рис. 3 б). Это говорит о том, что отличия полученных нами величин от ранее установленных для ледникового льда связаны с изменениями в пропорции накопления зимних и летних осадков. Это предположение подкрепляется метеорологическими наблюдениями на ближайших к району исследования станциях. Большинство метеостанций на Камчатке выявили незначительные тенденции изменения количества осадков за период 1966–2020 гг., однако для некоторых станций было отмечено значительное уменьшение осадков. Например, зимнее снижение осадков на станции Мыс Лопатка составило -22.4%/10 лет, а на станции Усть-Воямполка -10%/10 лет. Значительное уменьшение осадков зимой отмечено также в Усть-Хайрюзове,

Долиновке и Петропавловске-Камчатском. На станции Ича количество осадков уменьшилось во все сезоны. По данным реанализа ERA5, уменьшение осадков за 1950–2020 годы до -10%/10 лет наблюдается также зимой в северной и центральной части полуострова, весной количество осадков увеличилось [12].

Отклонения значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ от линии сезонного смещения ($\delta^2\text{H} = 7.4 \times \delta^{18}\text{O}$) указывает на дополнительные факторы, участвующие в формировании изотопных характеристик льда. Наиболее заметное отклонение от линии смещения отмечается для годовых слоёв 2011–2012 и 2021–2022 гг. и чётко выражается в величинах d-excess. Так, если изотопные параметры льда обусловлены только разным участием зимних и летних осадков, т.е. сезонным накоплением, изменению значения $\delta^{18}\text{O}$ для горизонта 2021–2022 гг. относительно среднего по керну = 0.11‰ (см. табл. 1) должно соответствовать изменение значения $\delta^2\text{H}$ на 0.8‰ ($\Delta\delta^2\text{H} = 7.4 \times \Delta\delta^{18}\text{O}$) и изменение дейтериевого эксцесса ($\Delta\text{d-excess} = \Delta\delta^2\text{H} - 8 \times \Delta\delta^{18}\text{O}$) на 0.07‰. Однако, как видно из табл. 1, изменение величины d-excess от среднего по керну для горизонта 2021–2022 г. составило 2.8‰. Увеличение дейтериевого эксцесса указывает на заметное изменение условий относительной влажности

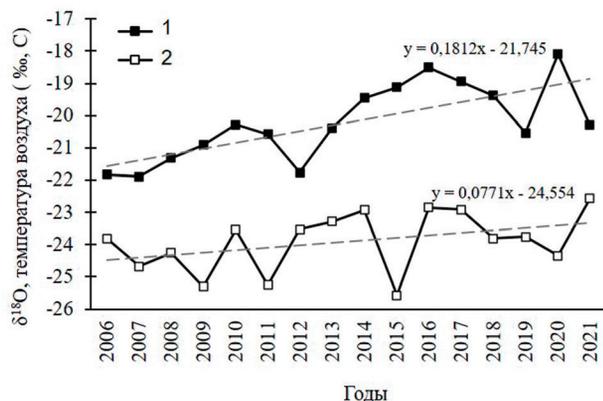


Рис. 4. Тренды изменения среднегодовых значений $\delta^{18}\text{O}$ (1) и температуры воздуха (2), рассчитанной по наблюдениям на метеостанции Ключи с учётом высотного градиента $-6^\circ\text{C}/\text{км}$. Метеорологическая информация по ст. Ключи (№32389) получена из базы данных ФГБУ ВНИИГМИ-МЦД [16].

и температуры поверхности моря в районе — источнике влаги по сравнению со средним многолетним. Согласно [13, 14], изотопный состав водяного пара в районе происхождения влаги определяется равновесными (зависящими от температуры поверхности моря) и кинетическими коэффициентами изотопного фракционирования, а также величиной относительной влажности. Величина дейтериевого эксцесса становится выше с увеличением SST ($0.35\text{‰}/^\circ\text{C}$) и уменьшением относительной влажности ($-0.43\text{‰}/\%$) [11]. Это означает, что условия в источнике влаги для 2011–2012 и 2021–2022 гг. отличались увеличением температуры поверхности моря и уменьшением относительной влажности воздуха по сравнению со среднемноголетними показателями. Локальные аномалии температур поверхности моря по данным HadSST [15] в диапазоне $1.5\text{--}3^\circ\text{C}$ относительно периода 1961–1990 г. фиксируются в акватории Японского и Охотского морей, а также в центральной части севера Тихого океана. Для этих же годовых слоёв льда в керне была отмечена обратная корреляция между индексом Тихоокеанского декадного колебания и величинами d-excess. Это может означать, что глобальные циркуляционные процессы в Тихом океане находят своё отражение в изотопной записи ледникового льда, однако этот вопрос требует дальнейшего изучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получен новый неглубокий ледниковый керн в кратере Горшкова вулкана Ушковский,

общая глубина которого составила 14 м, что соответствует 10.5 м водного эквивалента. Возраст льда был оценен по сезонным вариациям $\delta^{18}\text{O}$ и d-excess, и скорректирован по химическому составу пепловых горизонтов. Основание керна датируется летним сезоном 2006 г. (10.54 м в.экв.). Таким образом, толща льда в 10.5 м в.экв. сформировалась за 16 лет. Учитывая это, средняя годовая аккумуляция составляла 0.65 м в.экв.

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‰.

Особенностью изотопных параметров атмосферных осадков Камчатки является выраженная зависимость от сезонной смены основных источников воздушных масс, приносящих влагу. Зимой воздушные массы, образованные над Японским морем и Тихим океаном в секторе $30\text{--}40^\circ\text{с.ш.}$ и $140\text{--}160^\circ\text{в.д.}$, приносят осадки с высокими величинами d-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-excess. На изотопной диаграмме 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 смешение летних и зимних атмосферных осадков.

Полученные в 2022 г. изотопные данные демонстрируют выраженные тренды $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d-excess, подобные же достаточно резкие изменения отмечались в керне К-2, полученном в кратере вулкана Ушковский ранее. Мы полагаем, что изменения величин $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d-excess льда в наибольшей степени связаны с изменением структуры питания ледника — преобладанием осадков летнего (весеннего) сезона на фоне уменьшения осадков зимнего периода. Помимо этого, на изотопные параметры льда могут влиять изменения в источнике пара, откуда воздушные массы приносят осадки на Камчатку, наиболее чувствительным маркером таких изменений является дейтериевый эксцесс.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 22-17-00159. Анализ изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$,

$\delta^2\text{H}$) льда с вулкана Ушковский проводился в рамках мегагранта (Соглашение № 075-15-2021-599 от 08.06.2021) “Палеоэкологические реконструкции как ключ к пониманию прошлых, текущих и будущих изменений климата и окружающей среды в России”. Анализ климатической изменчивости в тихоокеанском регионе выполнен в рамках государственного задания Института географии РАН № FMGE-2019-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dansgaard W.* Stable isotopes in precipitation // *Tellus B.* 1964. V. 16. P. 436–468.
2. *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.
3. *Shiraiwa T., Yamaguchi S.* Reconstruction of Glacier Mass Balances and Climate Changes in the Kamchatka Peninsula // *Journal of Geography.* 2002. V. 111. № 4. P. 476–485.
4. *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.
5. *Wahl S., Steen-Larsen H. C., Hughes A. G., Dietrich L. J., Zühr A., Behrens M. et al.* Atmosphere-snow exchange explains surface snow isotope variability // *Geophysical Research Letters.* 2022. V. 49. e2022GL099529.
6. *Shiraiwa T., Muravyev Y. D., Yamaguchi S.* Stratigraphic features of firn as proxy climate signals at the summit ice cap of Ushkovsky volcano, Kamchatka, Russia // *Arct. Antarct. Alp. Research.* 1997. V. 29. P. 414–421.
7. *Shiraiwa T., Nishio F., Kameda T., Takahashi A., Toyama Y., Muravyev Y. D., Obsyannikov A.* Ice core drilling at Ushkovsky ice cap, Kamchatka, Russia // *Japanese Society of Snow and Ice.* 1999. № 61. P. 25–40 (in Japanese with English abstract and figure captions).
8. *Matoba S., Shiraiwa T., Tsushima A., Sasaki H., Muravyev Y. D.* Records of sea-ice extent and air temperature at the Sea of Okhotsk from an ice core of Mount Ichinsky, Kamchatka // *Annales of Glaciology.* 2011. V. 52. P. 44–50.
9. *Горбач Н. В., Философова Т. М., Михаленко В. Н.* Идентификация источников пеплов, захороненных в леднике на вершине вулкана Ушковский (Камчатка), при помощи анализа химического состава вулканического стекла // *Лед и Снег.* 2024. V. 64. № 1. P. 66–80.
10. *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.
11. *Pfahl S., Wernli H.* Air parcel trajectory analysis of stable isotopes in water vapor in the eastern Mediterranean // *Journal Geophysical Research.* 2008. V. 113. D20104. doi: 10.1029/2008JD009839.
12. *Korneva I. A., Toropov P. A., Muraviev A. Y., Aleshina M. A.* Climatic factors affecting Kamchatka glacier recession // *International Journal of Climatology.* 2024. V. 44. № 2. P. 345–369.
13. *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*, E. Tongiorgi (Ed.). Lab. Geol. Nucl., Pisa, Italy. 1965. P. 9–130.
14. *Merlivat L., Jouzel J.* Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation // *Journal of Geophysical Research.* 1979. V. 84 (C8). P. 5029–5033.
15. *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 // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* 2019. V. 124. <https://doi.org/10.1029/2018JD029867>
16. *Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Трофименко Л. Т., Швец Н. В.* Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485 от 23.10.2014.

NEW DATA OF DEUTERIUM EXCESS VALUES OF GLACIAL ICE OF KAMCHATKA

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

^a*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrology, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^c*Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation*

[#]*E-mail: eacentr@yandex.ru*

The isotopic signature ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, d-excess) of the ice of the Ushkovsky volcano in Kamchatka were studied. A new shallow ice core was obtained in 2022 in the Gorshkov crater. The 14 m long ice core was dated by counting annual layers, which were also compared with known eruptions in recent years. The upper 14 m of the glacier were formed over the last 16 years (from 2006 to 2022). The values of $\delta^{18}\text{O}$ vary from -16 to -24‰ , $\delta^2\text{H}$ from $-110,5$ to $-177,7\text{‰}$, the averaged values are $-20,5$ and $-150,2\text{‰}$, respectively. The d-excess value varies with depth from $8,7$ to $21,3\text{‰}$, the average value is $13,7\text{‰}$. For winter horizons at low values of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$, an increase in d-excess is noted. Such features are associated with the origin of moisture brought to Kamchatka. The source of moisture is the Pacific Ocean, the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan, for which there are pronounced differences in the conditions of moisture evaporation between summer and winter. The increasing trends in $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values from 2006 to 2022 are accompanied by a decrease in deuterium excess, indicating an increase of summer precipitation. However, in addition to changes in seasonal proportions of precipitation, ice d-excess values may reflect climatic changes in the source of moisture.

Keywords: Kamchatka, glacial ice, oxygen isotope composition, deuterium excess