

ХАРАКТЕРИСТИКА МИНЕРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В ЛЕДНИКОВОМ КЕРНЕ ВУЛКАНА УШКОВСКИЙ

© 2025 г. А. Г. Хайрединова¹, М. М. Виноградова¹, М. А. Воробьёв^{1,*},
С. С. Кутузов², Ю. Н. Чинова^{1,3}, С. В. Закусин^{3,4}, В. Н. Михаленко¹

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Школа наук о Земле, Университет штата Огайо, Колумбус, США

³Институт геологии рудных месторождений, петрологии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

⁴Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: m.vorobyev@igras.ru

Поступила 09.11.2024 г.

После доработки 13.12.2024 г.

Принята к печати 25.12.2024 г.

Осенью 2022 г. на Камчатке в кратере вулкана Ушковский получен неглубокий ледниковый керн длиной 14 м. Представлены результаты исследования минеральных частиц из ледникового керна, отобранного в этом регионе. Анализ включает определение концентрации пыли и её сезонной цикличности, минералогический состав и оценку потенциальных источников поступления частиц.

Ключевые слова: ледниковый керн, минеральные частицы, Камчатка, Ушковский

DOI: 10.31857/S2076673425010129, **EDN:** GXYQSY

ВВЕДЕНИЕ

Ледниковые керны представляют собой важнейший архив информации о прошлом климата Земли и составляют основу для палеоклиматических исследований. Они содержат в себе не только данные об изменении температуры и концентрации парниковых газов, но также информацию о минеральных частицах, захваченных в ледниковых слоях в результате атмосферного переноса пыли (Kutuzov et al., 2019). Минеральные аэрозоли, присутствующие в ледниках, играют ключевую роль в понимании климатических и атмосферных процессов, происходивших на протяжении тысячелетий (Steffensen et al., 2008).

Изучение минеральных частиц в ледниковых кернах позволяет реконструировать источники и пути переноса пыли, а также оценить влияние вулканической и пылевой активности на климат. Например, исследования кернов из Гренландии и Антарктиды показали, что концентрация минеральных частиц значительно возрастает в периоды ледниковых максимумов, указывая на усиление ветров и увеличение сухости климата в эти периоды (Ruth et al., 2003; Lambert et al., 2008). Анализ минерального состава микрочастиц может быть использован для определения основных источников

их происхождения (Bory et al., 2003; Svensson et al., 2008; Kutuzov et al., 2016).

Полуостров Камчатка обладает уникальными климатическими особенностями, сочетая морской и континентальный типы климата при суровых температурных условиях, избыточном увлажнении и значительной роли циклонической деятельности. Активная вулканическая деятельность и сильные ветра способствуют значительному переносу минеральных частиц, и ледниковые керны могут содержать информацию о региональных климатических изменениях и вулканической активности.

В прошлом в регионе было получено два глубоких керна на ледниках вулканов Ушковский и Ичинский (Shiraiwa et al., 1999; Matoba et al., 2007), однако данных по содержанию минеральной пыли опубликовано не было. Недавние исследования показали, что в настоящее время ледники Камчатки претерпевают изменения, связанные с преобразованием структуры питания ледника и участием талой воды в льдообразовании, что влияет на химическую и изотопную запись (Matoba et al., 2011; Chizhova et al., 2024). В связи с этим знание о содержании минеральных частиц и его сезонном ходе может сыграть ключевую роль в изучении ледниковых кернов данного региона.

В работе впервые публикуются результаты исследования микрочастиц в ледниковом керне, полученном на одном из ледников Камчатки. По данным о концентрации, сезонной цикличности и минералогическому составу была проведена оценка потенциальных источников поступления частиц.

МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

Район исследования. Вулкан Ушковский (56.04° с. ш., 160.28° в. д.), расположенный на полуострове Камчатка, входит в состав Ключевской группы вулканов, находящейся в центральной части полуострова. Кратер Горшкова, диаметром около 750 м и глубиной примерно 240 м, заполнен льдом. Среднегодовая температура льда на глубине 10 м составляет $-15.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Sato et al., 2013).

Общая циркуляция атмосферы на Камчатке определяется взаимодействием арктических и тихоокеанских воздушных масс. Основным источником влаги в регионе — Тихий океан и Охотское море, что объясняет обильные снегопады, особенно в зимний период. В холодное время года преобладают воздушные потоки с северо-запада и севера, которые приносят холодный воздух, обогащённый влагой, что способствует обильным снегопадам. Летом же преобладают юго-восточные и южные воздушные потоки, которые приносят тёплый и влажный воздух с океана, создавая условия для высокой облачности и частых осадков.

Анализ обратных траекторий воздушных масс для точки бурения, проведённый с использованием модели NOAA HYSPLIT (Stein et al., 2015) (рис. 1), показал значительную сезонную изменчивость. Зимой перенос воздушных масс из аридных регионов Азии, где возможна эмиссия значительного количества минеральных частиц в атмосферу, снижен из-за формирования Сибирского антициклона, который развивается на северо-западе, и Алеутской области пониженного давления — циклона, который формируется на западе. Летом преобладает Тихоокеанский антициклон, который развивается на юго-востоке. Это приводит к поступлению холодных континентальных воздушных масс, приходящих с северо-запада зимой, и к перемещению тёплых влажных воздушных масс через полуостров с юго-востока на северо-запад летом (Jones, Solomina, 2015).

В летнее время воздушные массы могут приносить минеральную пыль из пустынных и полупустынных регионов Азии, включая пустыни Гоби, Такла-Макан, а также аридные районы Южной Сибири. Эти регионы особенно активны в весенне-летний период, когда частые пыльные бури поднимают в воздух большое количество минеральных частиц. Аэрозоли из засушливых регионов могут переноситься на большие расстояния,

оседая на ледниках в Арктике и на субарктических территориях (Bory et al., 2003; Steffensen et al., 2008). Похожие исследования на Аляске продемонстрировали, что частицы атмосферной пыли из пустынь Центральной Азии могут достигать ледниковых областей (Yasunari et al., 2009). В то же время установлено, что около 2–3% минеральной пыли поступает в атмосферу из источников, расположенных в Арктической зоне выше 50° с.ш., что составляет порядка 27% от содержания атмосферной пыли в Арктике (Bullard et al., 2016). Однако эмиссия в Арктике изучена всё ещё слабо, в частности показано, что в Исландии, на Шпицбергене, Аляске и Гренландии основными источниками атмосферной пыли служат перигляциальные и парагляциальные отложения, характеризующиеся преобладанием мелкодисперсного материала и отсутствием растительности (Bullard et al., 2016). Очевидно, что обширные перигляциальные области на Архипелагах Российской Арктики также могут служить источниками минеральной пыли.

Полевые и лабораторные методы. В результате бурения ледника в кратере Горшкова на вулкане Ушковский был получен ледниковый керн длиной 14 м. Научное оборудование, снаряжение и участники экспедиции были доставлены вертолётom 15.09.2022. Бурение проводилось на высоте 3950 м с использованием буровой установки GeoTech. Полученный ледниковый керн был перевезён в Москву в замороженном состоянии. Подготовка образцов и основные анализы были выполнены в лаборатории палеоэкологических реконструкций в Институте географии РАН.

Первичная подготовку проб выполняли в морозильной камере при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Было произведено стратиграфическое описание ледникового керна. Для получения детализированной информации керн был нарезан на образцы с интервалом 5 см. Каждый образец разделяли на две части: одна половина сохранялась в архиве для дальнейшего использования, другая обрабатывалась для проведения анализов. Фирновую часть керна очищали керамическим ножом от внешних загрязнений в условиях морозильной камеры. Лёд проходил трёхстадийную обработку в ультраточной воде ($18.2\text{ МОм}\cdot\text{см}$) в лабораторных условиях. Затем образцы плавили при температуре $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ в полипропиленовой банке с закручивающейся крышкой в ламинарном шкафу. Всё оборудование и посуда, использованные при пробоподготовке, были предварительно промыты деонизированной водой ($18.2\text{ МОм}\cdot\text{см}$).

Концентрации частиц минеральной пыли измеряли в чистой комнате с использованием счётчика Beckman Coulter Counter Multisizer 4e с 400 каналами от 2 до 60 мкм. Фоновые концентрации микрочастиц в электролите контролиро-

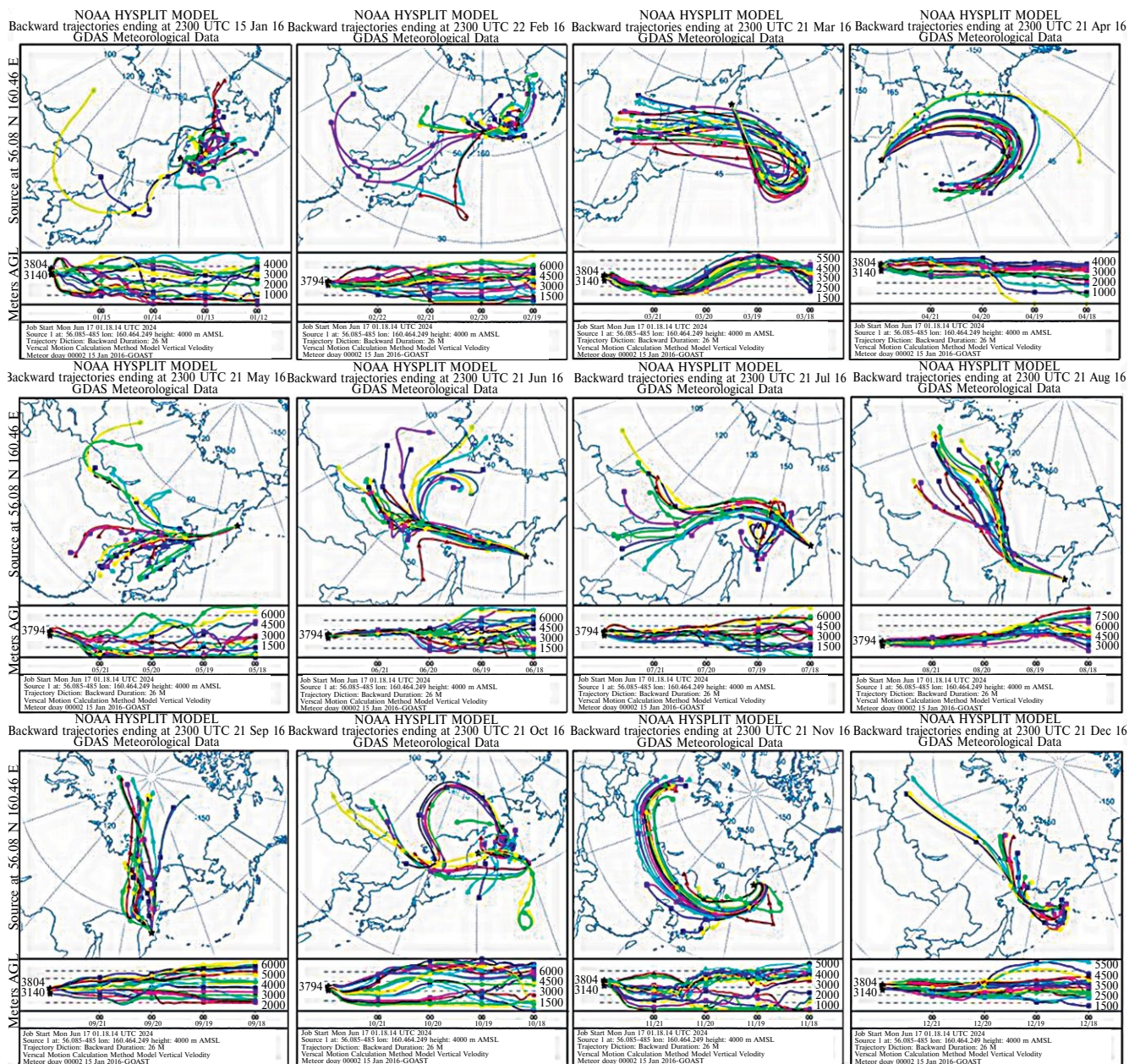


Рис. 1. Обратные траектории движения воздушных масс (NOAA Hysplit model). Исходная точка — место бурения на вулкане Ушковский (3794 м). Траектории построены для середины каждого месяца 2016 г. на 96 ч назад

Fig. 1. Backward trajectories of air mass transport (NOAA Hysplit model). The starting point is the drilling location on Ushkovsky Volcano (3794 m). Trajectories were constructed for the middle of each month in 2016, going back 96 hours

вались на протяжении всего измерения и составляли менее 200–500 частиц на миллилитр и не превышали 5% от концентрации частиц в самом чистом образце.

Перед анализом образцы трижды переворачивали для гомогенизации микрочастиц и предотвращения осаждения крупных частиц. Каждый образец измеряли не менее трёх раз, при этом для анализа использовали среднее значение результатов

трёх измерений. Размеры частиц определяли как сферические эквивалентные диаметры в микрометрах. Для анализа частиц на минералогический состав образцы были подготовлены с использованием системы вакуумной фильтрации MilliSolve. Для удаления загрязнителей использовались мембранные фильтры с диаметром пор 0.45 мкм. В качестве внешних фильтров применялись поликарбонатные фильтры с диаметром пор 0.2 мкм.

Снимки фильтров для визуального анализа получены с использованием оптического стереомикроскопа Leica MZ6, оснащённого объективами 1х и 2х, а также окуляром 10х. Для обработки изображений использовалась программа Thixomet lite.

Дифрактограммы образцов снимались на кафедре инженерной геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова при помощи рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultime-IV (Япония). Дифрактометр оснащён рентгеновской трубкой с Cu-анодом, полупроводниковым матричным детектором DTex/Ultra. Для подавления K β линии меди использовался Ni фильтр. Скорость съёмки 3°2 θ /мин. Количественный минеральный состав образцов определялся методом Ритвельда (Post & Bish, 1989) в программном комплексе Profex (Doebelin, 2015).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Концентрация минеральных частиц. Верхняя часть ледникового керна состоит из снега с тонкими прослоями льда, с глубины 2 м наблюдается чередование льда и льдистого фирна (рис. 2, а). Лёд в точке бурения формируется с участием инфильтрационной воды за счёт частых жидких осадков в летний период и проникновения дождевой воды вглубь толщи, а также сезонного таяния.

Предварительное датирование ледникового керна выполнено с использованием профилей изотопного состава (Chizhova et al., 2024) и реперных горизонтов вулканического пепла (Горбач и др., 2024). Горизонты были датированы по положительным пикам значений $\delta^{18}\text{O}$, которые являются индикаторами тёплого сезона; в то же время отрицательные пики, характерные для зимы, выражены слабее. Границы годовых слоёв определяли как середина летнего периода (рис. 2, в).

Анализ вулканических стёкол в керне позволил определить происхождение пепловых горизонтов (Горбач и др., 2024). Пепел с глубины 89–94 см связан с извержением вулкана Безымянного в октябре 2020 г., а с глубины 348–354 см – с извержением вулкана Шивелуч в декабре 2018 г. На глубине 761–777 см выявлены следы извержений вулканов Безымянного, Ключевского и Кизимена (2010–2011 гг.), но сохранение изотопного сигнала в этом интервале неоднозначно (Горбач и др., 2024).

Проведённый анализ концентрации минеральной пыли в сочетании с изотопными данными ($\delta^{18}\text{O}$) позволил выявить цикличность поступления минеральной пыли и уточнить датировку ледникового керна. Установлено, что концентрация минеральной пыли в керне зависит от сезонной изменчивости, а также отдельных событий переноса пыли из аридных районов и вулканической деятельности (Горбач и др., 2024).

Сравнение стратиграфии ледникового керна и распределения массовой концентрации минеральной пыли (C_p) показывает, что пепловые горизонты (тёмно-серые участки) совпадают с резкими повышениями концентрации пыли. Например, на глубинах около 3.5 м (извержение вулкана Шивелуч в 2018 г.) и около 8 м (извержения 2010–2013 гг.) наблюдаются значительные пики, связанные с вулканической активностью. Так, к вулканическим горизонтам можно отнести значительные повышения концентрации на глубинах: 0.89 м (220.824 частиц/мл), 3.5 м (C_p = 12.9·10⁶ частиц/мл), 7.56–7.61 м (C_p = 1.1·10⁶ частиц/мл) и 8.2 м (C_p = 22.2·10⁶ частиц/мл). В участках без пепловых отложений массовая концентрация пыли остаётся на более низком уровне, что соответствует фоновым значениям и сезонным колебаниям.

Для оценки сезонного хода минеральных частиц, связанных преимущественно с атмосферными процессами, образцы с повышенной концентрацией частиц, относящейся к вулканической деятельности, не рассматривались. Анализ концентрации пыли без вулканического привноса показал явную сезонную цикличность. Отчётливые летние пики фиксируются на глубинах: 0.81, 3.85, 4.5, 5.24, 5.89, 6.75 и 8 м. На участке 8–14 м заметно общее снижение количества поступающих частиц, при этом цикличность присутствует, но с менее выраженными пиками летней активности.

Минимальные значения концентрации пыли были зафиксированы на глубине 1.19 м и составили 356.4 ppb, что характерно для зимних периодов с минимальным поступлением пыли. Максимальные значения фоновой концентрации частиц зафиксированы на глубине 4.5 м (45969 ppb). Средняя массовая концентрация пыли по всем данным составляет 5099 ppb, а медиана 2784 ppb. Анализ размерности частиц показал, что от 66 до 100% (при среднем значении 91%) составляют частицы размерностью меньше 5 мкм. Соответственно, количество частиц больше 5 мкм варьирует от 0 до 33% (при среднем значении 9%).

Изменчивость минерального и химического состава микрочастиц. Минеральная пыль, которая переносится на дальние расстояния, осаждается на ледники и напрямую влияет на химический состав снега и льда. В результате в толще ледника образуются слои с различной концентрацией частиц. Изменчивость количества (C_p, частиц/мл) и массы (C_m, ppb) микрочастиц зависит от условий эмиссии, переноса и осаждения.

Основные ионные примеси в кернах льда можно разделить на категории по их типичным источникам (Legrand et al., 1997). Среди ионов, поступающих с поверхности морей и океанов, преобладают ионы растворимых солей, как правило, натрия (Na⁺), хлора (Cl⁻) и калия (K⁺). С поверхности

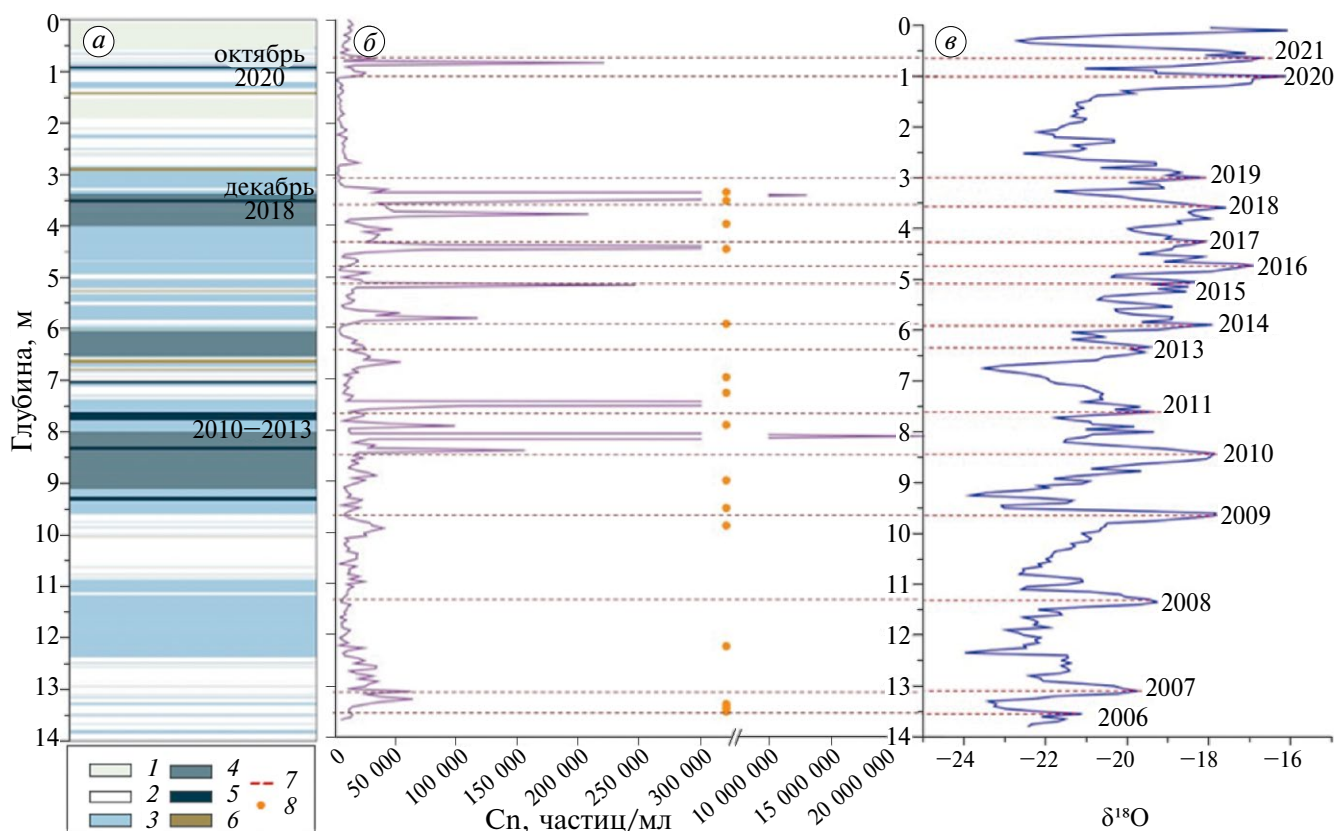


Рис. 2. Стратиграфия ледникового ядра (а): 1 – снег, 2 – фирн, 3 – лёд, 4 – диспергированный пепел, 5 – пепловые горизонты, 6 – загрязнения, предположительно отличные от пеплов. Распределение содержания минеральной пыли (Cn) по глубине (б). Распределение $\delta^{18}\text{O}$. 7 – границы датирования ядра. 8 – место отбора проб на минералогический анализ (в)

Fig. 2. Stratigraphy of the ice core. 1 – snow, 2 – firn, 3 – ice, 4 – dispersed ash, 5 – ash layers, 6 – contaminants, presumably different from ash (a). Depth distribution of mineral dust content (Cn) (b). Distribution of $\delta^{18}\text{O}$. 7 – core dating boundaries. 8 – sampling location for mineralogical analysis (c)

суши ионы поступают из пыли, переносимой ветром, в них преобладают ионы кальция (Ca^{2+}), также присутствуют ионы натрия, магния (Mg^{2+}) и сульфаты (SO_4^{2-}). Антропогенными являются нитраты (NO_3^-), ионы аммония (NH_4^+) и сульфаты. Эти ионы могут поступать также в виде продуктов сжигания биомассы. В то же время фториды, ионы кальция и магния могут поступать на поверхность ледников в результате вулканической активности.

При исследовании минеральной пыли особый интерес представляют Ca^{2+} и Mg^{2+} , поскольку именно эти катионы зачастую являются основными составляющими минеральной пыли.

В рамках настоящего исследования установлено, что в распределении минеральной пыли отмечается сезонная цикличность, при этом наблюдаются несовпадения с распределением химических элементов (рис. 3). Как было уже упомянуто, в ядре присутствует значительная доля инфильтрационного льда, что говорит об участии талой воды в рекристаллизации льда. В случае с химическими

элементами инфильтрация воды может приводить к миграции соединений в нижележащие слои.

Коэффициент корреляции для всего массива данных между массовой концентрацией пыли (Cm) и содержанием Mg^{2+} равен -0.05 , что указывает на слабую отрицательную корреляцию в исходных данных. При этом коэффициент корреляции для участка 0–8 м составляет 0.32 , что говорит об умеренной положительной корреляции. То же самое можно наблюдать и с катионом Ca^{2+} . Коэффициент корреляции между Cm и Ca^{2+} на всей глубине составляет -0.08 , а для участка 0–8 м он равен 0.3 .

Сравнение графиков распределения частиц (Cn, Cm) с графиками распределения кальция и магния позволяет выявить ряд закономерностей. На участке глубин от 3 до 8 м зоны повышенной фоновой концентрации частиц расположены выше, чем схожие пики концентрации Ca^{2+} и Mg^{2+} , т.е. существует смещение профилей распределения химических соединений. На рис. 4 приведён

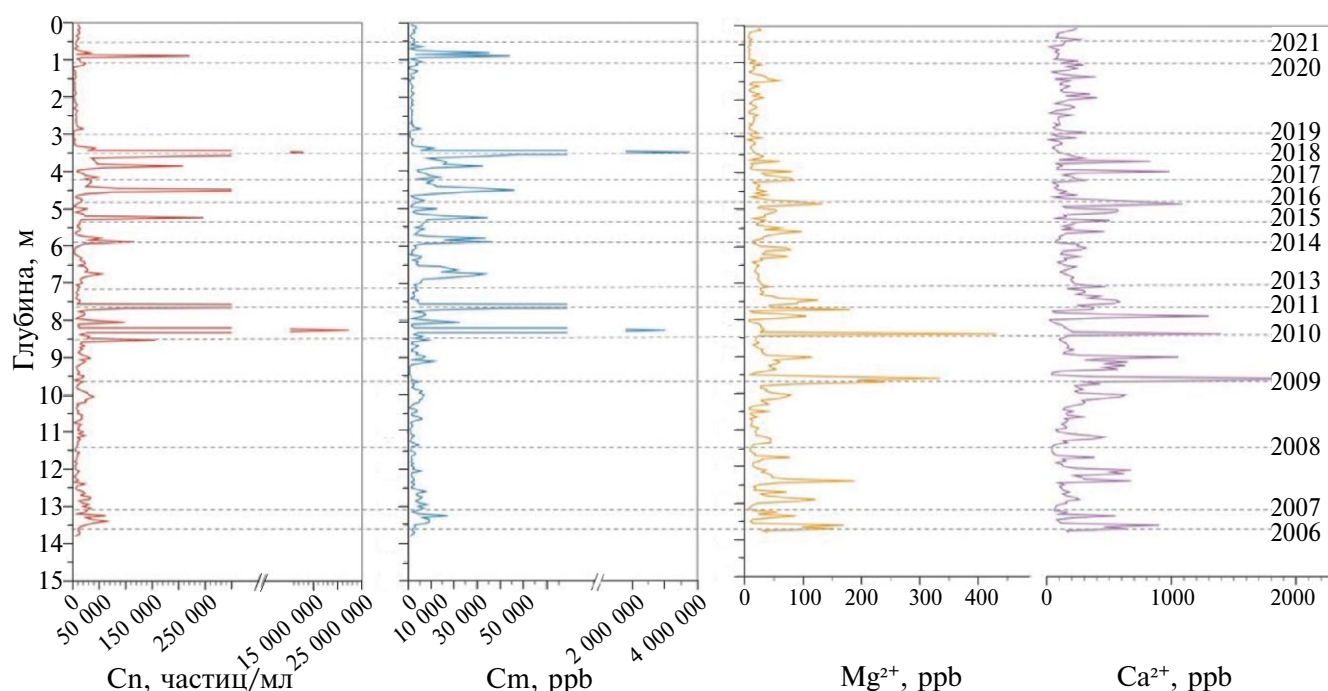


Рис. 3. Профили распределения массовой (Cm) и числовой (Cn) концентраций минеральной пыли и ионов кальция и магния с глубиной ледникового керна

Fig. 3. Profiles of the mass (Cm) and numerical (Cn) concentrations of mineral dust and the concentrations of calcium and magnesium ions with depth in the ice core

визуальный анализ, где показано вероятное соответствие максимумов распределения Cm и Mg^{2+} .

Для массивов данных Cm и Mg^{2+} рассчитана кросс-корреляция по всей длине керна (рис. 5, табл. 1), которая показывает значения выше пороговых, отличных от шума, при сдвиге на 6 и 7 значений (что соответствует 30 и 35 см). Сравнение проводилось без учёта пиков, соответствующих привнесу вулканического материала в данных содержания минеральной пыли. Так, при учёте смещения профилей концентрации Mg^{2+} и Ca^{2+} на 30–35 см по глубине связь с концентрацией частиц на этом участке керна улучшается, что может говорить о миграции химических элементов в нижележащие слои в процессе формирования снежно-фирновой толщи.

Процессы миграции химических элементов происходят с различной интенсивностью в разные годы. Для более глубоких слоёв керна смещение данных с другим шагом также позволило достичь значимых коэффициентов корреляции, что говорит о неравномерности миграции в зависимости от метеорологических особенностей отдельных летних сезонов. Так, в более тёплые сезоны с повышенной интенсивностью таяния может происходить глубокая миграция катионов из верхних слоёв льда, что вызывает временное смещение их пикового содержания относительно концентрации

пыли. В другие годы, при менее активном таянии, этот эффект может быть менее заметен или вовсе отсутствовать, что создаёт дополнительные трудности в интерпретации данных о химическом составе ледниковых кернов. При этом концентрация минеральных частиц в меньшей степени подвержена влиянию инфильтрации талой воды и может быть использована для датирования ледниковых кернов Камчатки.

Минеральный состав. Визуально образцы можно разделить на три категории: со слоями пылевых отложений, с крупнозернистым и с мелкодисперсным материалом чёрного цвета.

Анализ методом рентгеновской дифракции показал, что образцы на фильтрах из керна ледника Ушковский представлены в основном полевыми шпатами (плагиоклазами), также в составе присутствуют глинистые минералы: смектит, хлорит, слюдистые минералы и каолинит; из примесных минералов встречаются кальцит, пироксены, амфиболы, аморфный кремнезём и гематит. Результаты количественного минерального анализа представлены в табл. 2. Следует отметить, что из 17 изученных образцов 12 соответствуют визуально заметным прослоям, свидетельствующим о преимущественно вулканическом происхождении (см. рис. 2), тогда как пять образцов в нижней части керна — без видимых вулканических горизонтов.

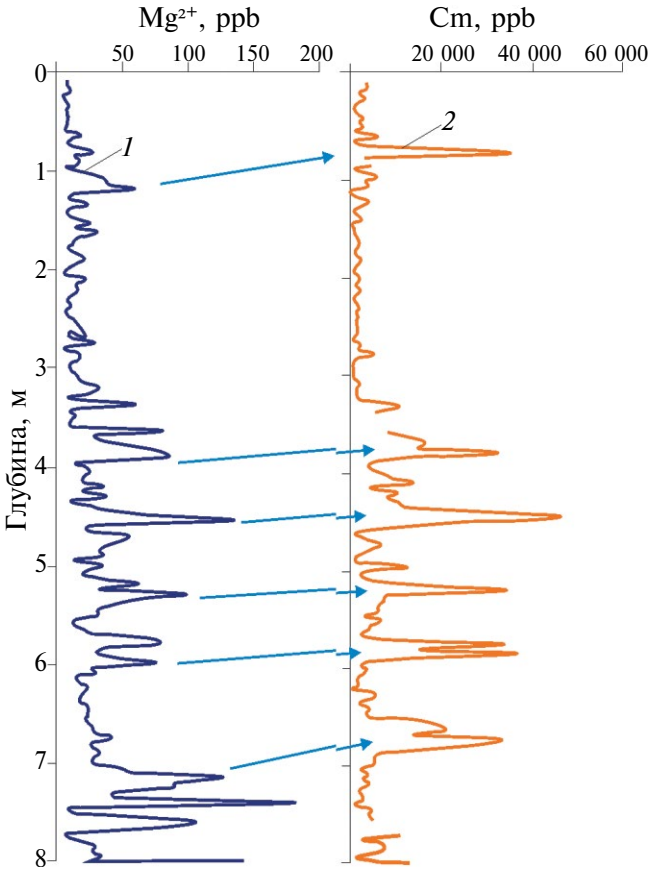


Рис. 4. Графики распределения Mg^{2+} , ppb (1) и Cm, ppb (2)
Fig. 4. The distribution of Mg^{2+} , ppb (1) and Cm, ppb (2)

На основании полученных данных можно предположить, что минеральные частицы в ледниковом керне вулкана Ушковский могут поступать из трёх потенциальных источников: 1) выветривания местных материнских, преимущественно вулканических пород; 2) отложение частиц вулканического пепла в результате извержений вулканов; 3) отложение частиц из аридных районов в результате дальнего эолового переноса.

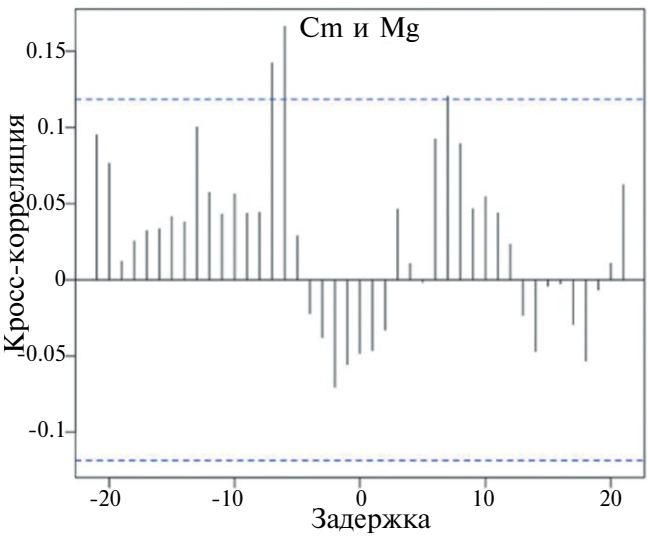


Рис. 5. Кросс-корреляция для двух массивов данных Cm и Mg^{2+} . Ось Y – коэффициент кросс-корреляции. Ось X – временной лаг (задержка). Синий пунктир – границы значимости кросс-корреляции
Fig. 5. Cross-correlation for two data arrays, Cm and Mg^{2+} . Y-axis: cross-correlation coefficient. X-axis: time lag (delay). Blue dotted lines: significance boundaries for cross-correlation

Одним из ключевых компонентов во всех интервалах являются плагиоклазы, которые доминируют на всех глубинах, особенно в интервалах USH 337–400 (82.7 %), USH 374–400 (73.6 %) и USH 910–960 (77.3 %). Это указывает на преимущественное присутствие вулканических пород, которые служат основным источником плагиоклазов (Gow et al., 1971; Ram et al., 1996).

Смектит встречается в больших количествах в отдельных интервалах, таких как USH 960–1000 (17%) и USH 337–344, 354–369 (12.7%). Наличие смектитов может свидетельствовать о продолжительном выветривании. Как правило, присутствие глинистых минералов в ледниковых кернах высокогорных ледников указывает на то, что минеральные

Таблица 1. Значения кросс-корреляции для двух массивов данных Cm и Mg

–21	–20	–19	–18	–17	–16	–15	–14	–13	–12	–11
0.095	0.076	0.012	0.025	0.032	0.033	0.041	0.038	0.1	0.057	0.043
–10	–9	–8	–7	–6	–5	–4	–3	–2	–1	0
0.056	0.044	0.044	0.142	0.166	0.029	–0.022	–0.038	–0.07	–0.055	–0.048
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
–0.046	–0.033	0.046	0.011	–0.002	0.092	0.12	0.089	0.047	0.054	0.044
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
0.023	–0.023	–0.047	–0.004	–0.003	–0.029	–0.053	–0.006	0.011	0.062	

Таблица 2. Количественный минеральный состав группы образцов ледника Ушковский, мас. %

Индекс пробы с указанием глубины отбора в см	Смектит	Каолинит	Хлорит	Слюдистые минералы	Кварц	Плагиокла- зы	Кальцит	Аморфный кремнезём	Пироксен	Амфиболы	Гематит
USH 337–400	–	–	–	–	1.1	82.7	–	–	10.7	4.7	0.7
USH 337–344, 354–369	12.7	–	–	–	–	78.5	–	–	4.4	3.0	1.5
USH 374–400	11.7	–	–	2.8	1.2	73.6	–	–	7.3	3.5	–
USH 400–445	–	–	2.3	6.3	10.5	77.9	–	–	3.0	–	–
USH 450–460	–	–	4.4	4.5	1.0	80.5	–	–	5.0	4.6	–
USH 599–680	10.2	–	–	3.9	–	67.2	–	11.2	7.6	–	–
USH 761–767	–	–	1.9	12.8	–	67.9	1.5	15.9	–	–	–
USH 705–710, 736–761, 767–772	6.1	–	2.1	8.2	1.2	80.3	2.1	–	–	–	–
USH 800–910	–	–	–	3.4	3.2	43.3	–	40.5	9.7	–	–
USH 800–858	3.2	3.8	–	17.2	5.3	32.2	–	33.6	4.7	–	–
USH 910–960	–	–	–	7.2	4.8	77.3	4.5	–	6.2	–	–
USH 960–1000	17.0	–	–	–	1.1	62.9	–	–	19.0	–	–
USH 1000–1050	6.9	–	26.2	27.5	1.3	36.0	2.1	–	–	–	–
USH 1130–1240	16	–	18	28	4	34	–	–	–	–	–
USH 1240–1335	4	–	21	33	6	33	3	–	–	–	–
USH 1350–1365	20	–	32	27	3	16	2	–	–	–	–
USH 1365–1385	14	–	25	36	5	14	6	–	–	–	–

Серым выделены образцы, соответствующие визуально заметным прослоям вулканического пепла. Прочерк – данные отсутствуют.

частицы поступают на ледник за счёт эолового переноса (Kutuzov et al., 2016). Слюдистые минералы, концентрация которых достигает 27.5% в интервале USH 1000–1050 и 33% в интервале USH 1240–1335, также представляют собой важный компонент осадочного комплекса и могут указывать на перенос тонкодисперсного материала. Содержание амфиболов и пироксенов варьирует в зависимости от глубины. Максимальная концентрация пироксенов зафиксирована в интервале USH 960–1000 (19%), тогда как амфиболы в значительных количествах присутствуют в образце USH 337–400 (4.7%). При этом в образцах ниже ни пироксенов, ни амфиболов не зафиксировано. Аморфный кремнезём достигает максимальной концентрации в интервале USH 800–910 (40.5%), что указывает на наличие вулканического стекла или других аморфных фаз, типичных для вулканических выбросов. Кальцит – характерный минерал эолового переноса, присутствует на разных глубинах с максимальной концентрацией (6%) в интервале USH 1365–1385.

Данные о минеральном составе свидетельствуют, что поступление частиц на ледник Ушковский происходит как за счёт локального, так и за счёт дальнего переноса. Данные минерального анализа показывают, что в образцах преобладают частицы, характерные для вулканических пород. Соотношение пироксенов, амфиболов и аморфного кремнезёма может быть использовано для выделения микрочастиц, образовавшихся за счёт выветривания расположенных поблизости выходов вулканических пород и стекловатых частиц пепла. Индикаторами дальнего переноса могут быть содержание глинистых минералов (смектита, каолинита, хлорита) и снижение доли плагиоклазов. Следует учитывать, что отложение частиц на леднике происходит непрерывно и источники частиц в проанализированных образцах смешанные. Исследования среднего минерального состава эоловой взвеси в приводном слое атмосферы над морями Российской Арктики показывают, что содержание хлорита составляет в среднем 24%, и объясняется

это тем, что иллит и хлорит весьма характерны для глинистых минералов почв суши и донных осадков Арктики в соответствии с климатической зональностью. При этом распределение монтмориллонита (сметита) в аэрозолях арктических морей определяется распространением базальтов (Земля Франца-Иосифа, Патомское нагорье, бассейн Лены, Хатанги и Енисея, Аляска) и составляет в среднем 3% (Шевченко и др., 2000). Заметное содержание сметита наблюдается практически во всех образцах, что может говорить о фоновом присутствии частиц эолового переноса в атмосфере. Интересно, что анализ современных отложений лёссов и ледниковых отложений на Аляске показал, что минеральный состав образцов представлен хлоритом, мусковитом, кварцем и плагиоклазом. При этом хлорит является доминирующим минералом, содержащим железо в образцах (Muhs et al., 2013; Koffman et al., 2021). Для сравнения, минеральная пыль азиатских пустынь в среднем содержит преимущественно вторичные минералы, включая иллит (55%), каолинит (29%), хлорит (12%) и сметит (4%), а также около 2% гематита и гетита (Lu et al., 2017).

Проведённое предварительное исследование показывает, что анализ минерального состава потенциально может быть использован для определения источников поступления частиц на ледниках Камчатки. Для более обоснованных выводов об источниках микрочастиц на ледниках Камчатки требуется отбор образцов на минералогический и геохимический анализ из потенциальных источников, которые могут включать как локальные (моренный материал, выходы вулканических пород), так и удалённые (перигляциальные и лёссовые отложения в арктическом регионе и аридные регионы Азии) районы.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сезонные вариации. В рамках исследования установлено, что в распределении минеральной пыли присутствует сезонная цикличность, при этом есть несовпадения с распределением тяжёлого изотопа кислорода $\delta^{18}\text{O}$. По положительным пикам величин $\delta^{18}\text{O}$, как маркеров тёплого периода, были проведены границы годовых слоёв, так как отрицательные пики, характерные для зимнего периода, проявлены хуже (Chizhova et al., 2024). Это может быть связано с особенностями накопления зимних осадков или их частичной потерей. Кроме того, большая часть керна состоит из конгеляционного и инфильтрационного льда, сформированного быстрым замерзанием талой воды. Всё это привело к тому, что датировать керн, опираясь только на распределение значений $\delta^{18}\text{O}$, не представляется возможным, и датирование дополнительно опирается на хорошо задокументированные извержения

вулканов Камчатки (Горбач и др., 2024). Таким образом, по положительным пикам значения $\delta^{18}\text{O}$ льда были получены среднегодовые изотопные характеристики, однако границы сезонов точно определить не удалось. Для высокогорных ледников надёжным маркером перехода от зимнего к летнему сезону служит концентрация иона NH_4^+ , основным источником которого в снеге и, соответственно, в ледниковом льду является растительность в активной фенологической фазе, соответствующей тёплому полугодию (Preunkert et al., 2019). Однако в содержание этого иона во льду Камчатки существенный вклад вносит вулканическая активность и лесные пожары, что затрудняет его использование для датировки керна. Поэтому поиск дополнительных сезонных маркеров — актуальная задача.

Пики концентрации минеральных частиц могут свидетельствовать о начале летнего сезона, когда поверхность освобождается от снежного покрова и запылённость атмосферы увеличивается. Несовпадение пиков частиц и значений $\delta^{18}\text{O}$ обусловлено тем, что максимальные значения $\delta^{18}\text{O}$ не обязательно характеризуют осадки июля, это могут быть осадки любого летнего месяца, и разделение на годовые слои в значительной мере условно. Поскольку дата начала тёплого сезона меняется год от года и не соответствует календарному лету, горизонты с повышенной концентрацией минеральных частиц не совпадают с границами годовых слоёв по $\delta^{18}\text{O}$. Помимо этого, при анализе химического и изотопного состава ледниковых кернов Камчатского региона необходимо учитывать влияние инфильтрации талых вод. Так, например, катионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , которые являются индикаторами минеральной пыли, легко мигрируют (Eichler et al., 2001). Из-за нарушения изотопной и химической записей вследствие инфильтрации воды и миграции элементов, пиковые летние концентрации смещаются ниже. Минеральные частицы напротив, остаются в структуре фирна и не мигрируют. Совместное использование графиков распределения минеральной пыли и $\delta^{18}\text{O}$ позволяет уточнить датировку ледниковых кернов Камчатки.

Источники поступления минеральных частиц. Отложение минеральной пыли на ледниках Камчатки зависит от вулканической активности, сезонного хода фонового содержания частиц в атмосфере, высоты пограничного слоя и крупных событий переноса пыли из аридных регионов.

В качестве химического маркера минеральных частиц в ледниковых кернах часто используется Ca^{2+} , который, являясь основным катионом карбонатных пород, поступает в атмосферу при пылевых бурях и осаждается на ледниках в результате дальнего переноса аэрозолей (Fischer et al., 2007). Кроме того, было показано, что присутствие минеральных частиц также оказывает существенное

влияние на содержание Mg^{2+} в ледниковом льду (de Angelis et al., 1992; Kutuzov et al., 2019).

Мировой опыт исследований говорит о том, что вероятность переноса минеральных частиц из засушливых районов в ледниковые регионы Северного полушария достаточно высока (Bory et al., 2003; Svensson et al., 2008). Моделирование атмосферного переноса показало, что эти частицы могут перемещаться на тысячи километров, оседая на арктических и субарктических ледниках, что делает подобные события важными для понимания климатических изменений (Kallos et al., 2006; Újvári et al., 2022). Осаждение значительной части минеральных частиц на поверхности ледников Аляски представляет собой результат дальнего переноса аэрозолей, преимущественно из пустынных регионов Центральной Азии, таких как Гоби и Такла-Макан (Yasanuri et al., 2007). В то же время были описаны значительные пыльные бури в перигляциальных областях Аляски (Crusius et al., 2011), а недавние исследования показали, что минеральные частицы, поступающие в атмосферу во время пыльных бурь в долине реки Медной (Copper valley) в Южной Аляске, переносятся на значительные расстояния и достигают Камчатки (Barr et al., 2023).

Возможность дальнего переноса частиц подтверждает анализ их размерности, однако незначительная продолжительность данных в неглубоком керне вулкана Ушковский не позволяет однозначно установить источники происхождения материала. Дополнительные трудности в интерпретации содержания минеральных частиц представляет отложение пепловых горизонтов, в которых концентрация частиц возрастает на несколько порядков. Тем не менее ледниковые керны Камчатки могут быть использованы для исследования процессов переноса минеральных частиц в атмосфере при условии использования комплекса методов, включающих минеральный и химический состав, а также изотопные методы, которые могут быть использованы для более точного определения происхождения материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые представлены данные о содержании и минеральном составе частиц в ледниковом керне вулкана Ушковский на Камчатке. На счётчике частиц Коултера был выполнен анализ твёрдых нерастворимых микрочастиц, состоящих из минеральной пыли и продуктов извержения вулканов в ледниковом керне длиной 14 м, полученном весной 2022 г. в кратере вулкана Ушковский и охватывающем период с 2006 по 2022 г.

Показано, что массовая концентрация минеральных частиц демонстрирует цикличность, связанную с сезонными изменениями. Однако

значительное влияние талой воды на миграцию химических элементов, таких как Ca^{2+} и Mg^{2+} , приводит к смещению их пиков относительно концентрации частиц. Это смещение указывает на процесс миграции катионов, который может происходить неравномерно в разные годы, что влияет на точность интерпретации данных.

Данные о минеральном составе свидетельствуют, что поступление минеральных частиц на ледник Ушковский происходит как за счёт локального (моренный материал, продукты вулканической деятельности), так и за счёт дальнего переноса, вероятно, из аридных районов Евразии, а также из лёссовых отложений в арктическом регионе. Для точного установления источников минеральных частиц требуется проведение дополнительных исследований, включающих изучение минерального и химического состава, а также изотопные методы определения происхождения материала.

Проведённое исследование подчёркивает важность ледниковых кернов для понимания процессов переноса минерального аэрозоля в атмосфере, а также необходимость дальнейших исследований, направленных на уточнение механизмов переноса и динамики поступления минеральных частиц в ледники Камчатки. Будущие работы, включающие длинные ряды распределений минеральных частиц, а также химические и изотопные исследования, смогут предоставить более точные данные о механизмах атмосферного переноса минеральных частиц и их влиянии на ледники в северной части Тихого океана и арктическом регионе.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 22-17-00159. Лабораторный анализ 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”. Экспериментальные исследования минерального состава были проведены с использованием оборудования, приобретённого за счёт Программы развития МГУ имени М.В. Ломоносова.

Авторы выражают благодарность И.И. Лаврентьеву, П.А. Торопову, Я.Д. Муравьёву и А.А. Абрамову за помощь при бурении и организации работ, Ю.В. Конопляниковой и А.В. Долгих за проведение анализов на стереомикроскопе, С.А. Гариной и И.А. Морозову за помощь в проведении минерального анализа.

Acknowledgements. This work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation grant 22-17-00159. Laboratory analysis of ice from the Ushkovsky volcano was carried out as part of the megagrant (Agreement No. 075-15-2021-599 dated June 8, 2021) “Paleoecological Reconstructions

as a Key to Understanding Past, Current, and Future Climate and Environmental Changes in Russia". Experimental studies of minerals composition were partially performed using equipment acquired with the funding of Moscow State University Development Program

The authors express their gratitude to I.I. Lavrentyev, P.A. Toropov, Ya.D. Muravyov, and A.A. Abramov for their assistance with drilling and organizing the work, as well as to Yu.V. Konoplyanikova and A.V. Dolgikh for performing analyses on the stereomicroscope, S.A. Garanina and I.A. Morozov for their help in the mineral analysis.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Горбач Н.В., Филоsoфова Т.М., Михаленко В.Н. Идентификация горизонтов тефры в леднике на вершине вулкана Ушковский (Камчатка) // Лёд и Снег. 2024. Т. 64. № 1. С. 66–80.
<https://doi.org/10.31857/S2076673424010053>
- Шевченко В.П., Лисицин А.П., Виноградова А.А., Смирнов В.В., Серова В.В., Штайн Р. Аэрозоли Арктики — результаты десятилетних исследований // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 6–7. С. 551–576.
- de Angelis M., Barkoy N.I., Petrov V.I. Sources of continental dust over Antarctica during the last glacial cycle // Journal of Atmospheric Chemistry. 1992. V. 14. P. 233–244.
<https://doi.org/10.1007/BF00115236>
- Barr S.L., Wyld B., McQuaid J.B., Neely III R.R., Murray B.J. Southern Alaska as a source of atmospheric mineral dust and ice-nucleating particles // Science Advances. 2023. V. 9. № 33. P. 3708.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.adg3708>
- Bory A.J.-M., Biscaye P.E., Piotrowski A.M., Steffensen J.P. Regional variability of ice core dust composition and provenance in Greenland // Geochemistry Geophysics Geosystems. 2003. V. 4. № 12. P. 1107.
<https://doi.org/10.1029/2003GC000627>
- Bullard J.E., Baddock M., Bradwell T., Crusius J., Darlington E., Gaiero D., Gassó S., Gisladdottir G., Hodgkins R., McCulloch R., McKenna-Neuman C., Mockford T., Stewart H., Thorsteinsson T. High-latitude dust in the Earth system // Reviews of Geophysics. 2016. V. 54. P. 447–485.
<https://doi.org/10.1002/2016RG000518>
- Chizhova Yu.N., Mikhaleiko V.N., Korneva I.A., Muravyov Ya.D., Hayredinova A.G., Vorobiev M.A. New data on deuterium excess values of glacial ice in Kamchatka Peninsula // Doklady Earth Sciences. 2024. V. 517. № 2. P. 1387–1392.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X24602190>
- Crusius J., Schroth A.W., Gassó S., Moy C.M., Levy R.C., Gatica M. Glacial flour dust storms in the Gulf of Alaska: hydrologic and meteorological controls and their importance as a source of bioavailable iron // Geophysical Research Letters. 2011. V. 38. № 6. P. L06602.
<https://doi.org/10.1029/2010GL046573>
- Doebelin N., Kleeberg R. Profex: A graphical user interface for the Rietveld refinement program BGMN // Journal of Applied Crystallography. 2015. V. 48. P. 1573–1580.
<https://doi.org/10.1107/S1600576715014685>
- Eichler A., Schwikowski M., Gäggeler H.W. Meltwater induced relocation of chemical species in Alpine firn // Tellus B. 2001. V. 53B. P. 192–203.
<https://doi.org/10.3402/tellusb.v53i2.16575>
- Fischer H., Fundel F., Ruth U., Twarloh B., Wegner A., Udisti R., Becagli S., Castellano E., Morganti A., Severi M., Wolff E., Littot G., Röthlisberger R., Mulvaney R., Hutterli M.A., Kaufmann P., Federer U., Lambert F., Bigler M., Hansson M., Jonsell U., de Angelis M., Boutron C., Siggaard-Andersen M.-L., Steffensen J.P., Barbante C., Gaspari V., Gabrielli P., Wagenbach D. Reconstruction of millennial changes in dust emission, transport and regional sea ice coverage using the deep EPICA ice cores from the Atlantic and Indian Ocean sector of Antarctica // Earth and Planetary Science Letters. 2007. V. 260. № 1–2. P. 340–354.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.06.014>
- Gow A.J., Williamson T. Volcanic ash in the Antarctic ice sheet and its possible climatic implications // Earth and Planetary Science Letters. 1971. V. 13. № 1. P. 210–218.
[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(71\)90126-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(71)90126-9)
- Jones V., Solomina O. The geography of Kamchatka // Global and Planetary Change. 2015. V. 134. P. 3–9.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.06.003>
- Kallos G., Papadopoulos A., Katsafados P., Nickovic S. Transatlantic Saharan dust transport: Model simulation and results // Journal of Geophysical Research: Atmosphere. 2006. V. 111. № D9. P. D09204.
<https://doi.org/10.1029/2005JD006207>
- Koffman B.G., Yoder M.F., Methven T., Hanschka L., Sears H.B., Saylor P.L., Wallace K.L. Glacial dust surpasses both volcanic ash and desert dust in its iron fertilization potential // Global Biogeochemical Cycles. 2021. V. 35. P. e2020GB006821.
<https://doi.org/10.1029/2020GB006821>
- Kutuzov S.S., Mikhaleiko V.N., Grachev A.M., Ginot P., Lavrentiev I.I., Kozachek A.V., Krupskaya V.V., Ekaykin A.A., Tielidze L.G., Toropov P.A. First geophysical and shallow ice core investigation of the Kazbek plateau glacier, Caucasus Mountains // Environmental Earth Sciences. 2016. V. 75. P. 1488.
<https://doi.org/10.1007/s12665-016-6295-9>
- Kutuzov S., Legrand M., Preunkert S., Ginot P., Mikhaleiko V., Shukurov K., Poliukhov A., Toropov P. The Elbrus (Caucasus, Russia) ice core record — Part 2: History of desert dust deposition // Atmospheric Chemistry and Physics. 2019. V. 19. P. 14133–14148.
<https://doi.org/10.5194/acp-19-14133-2019>

- Lambert F., Delmonte B., Petit J., Bigler M., Kaufmann P.R., Hutterli M.A., Stocker T.F., Ruth U., Steffensen J.P., Maggi V. Dust-climate couplings over the past 800,000 years from the EPICA Dome C ice core // *Nature*. 2008. V. 452. P. 616–619.
<https://doi.org/10.1038/nature06763>
- Legrand M., Mayewski P.A. Glaciochemistry of polar ice cores: A review // *Reviews of Geophysics*. 1997. V. 35. № 3. P. 219–243.
<https://doi.org/10.1029/96RG03527>
- Lu W., Zhao W., Balsam W., Lu H., Liu P., Lu Z., Ji J. Iron mineralogy and speciation in clay-sized fractions of Chinese desert sediments // *Journal of Geophysical Research – D: Atmospheres*. 2017. V. 122. P. 13458–13471.
<https://doi.org/10.1002/2017JD027733>
- Matoba S., Ushakov S.V., Shimbori K., Sasaki H., Yamasaki T., Ovshannikov A.A., Manevich A.G., Zhideleeva T.M., Kutuzov S., Muravyev Ya.D., Shiraiwa T. The glaciological expedition to Mount Ichinsky, Kamchatka, Russia // *Bulletin of Glaciological Research*. 2007. V. 24. P. 79–85.
<http://hdl.handle.net/2115/20566>
- Matoba S., Shiraiwa T., Tsushima A., Sasaki H., Muravyev Ya.D. Records of sea-ice extent and air temperature at the Sea of Okhotsk from an ice core of Mount Ichinsky, Kamchatka // *Annals of Glaciology*. 2011. V. 52. № 58. P. 44–50.
<http://doi.org/10.3189/172756411797252149>
- Muhs D.R., Budahn J.R., McGeehin J.P., Bettis III E.A., Skipp G., Paces J.B., Wheeler E.A. Loess origin, transport, and deposition over the past 10,000 years, Wrangell-St. Elias National Park, Alaska // *Aeolian Research*. 2013. V. 11. P. 85–99.
<https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2013.06.001>
- Post J.E., Bish D.L. Rietveld refinement of crystal structures using powder X-Ray diffraction data // *Reviews in Mineralogy*. 1989. V. 20. P. 277–308.
<https://doi.org/10.1515/9781501509018-012>
- Preunkert S., Legrand M., Kutuzov S., Ginot P., Mikhaleiko V., Friedrich R. The Elbrus (Caucasus, Russia) ice core record – Part 1: reconstruction of past anthropogenic sulfur emissions in south-eastern Europe // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019. V. 19. № 22. P. 14119–14132.
<https://doi.org/10.5194/acp-19-14119-2019>
- Ram M., Donarummo Jr.J., Sheridan M. Volcanic ash from Icelandic ~57 300 Yr BP eruption found in GISP2 (Greenland) Ice Core // *Geophys. Research Letters*. 1996. V. 23. № 22. P. 3167–3169.
<https://doi.org/10.1029/96GL03099>
- Ruth U., Wagenbach D., Steffensen J.P., Bigler M. Continuous record of microparticle concentration and size distribution in the central Greenland NGRIP ice core during the last glacial period // *Journ. of Geophys. Research: Atmosphere*. 2003. V. 108. № D3. P. 4098.
<https://doi.org/10.1029/2002JD002376>
- 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*. 2013. V. 9. P. 2153–2181.
<https://doi.org/10.5194/cpd-9-2153-2013>
- Shiraiwa T., Nishio F., Kameda T., Takahashi A., Toyama Y., Muravyev Ya.D., Ovsyannikov A.A. Ice core drilling at Ushkovsky ice cap, Kamchatka, Russia // *Seppyo*. 1999. V. 61. № 1. P. 25–40.
<https://doi.org/10.5331/seppyo.61.25>
- Steffensen J.P., Andersen K.K., Bigler M., Clausen H.B., Dahl-Jensen D., Fischer H., Goto-Azuma K., Hansson M.E., Johnsen S.J., Jouzel J., Masson-Delmotte V., Popp T., Rasmussen S.O., Rothlisberger R., Ruth U., Stauffer B., Siggaard-Andersen M.-L., Sveinbjörnsdóttir A.E., Svensson A., White J.W.C. High-resolution Greenland ice core data show abrupt climate change happens in few years // *Science*. 2008. V. 321. № 5889. P. 680–684.
<https://doi.org/10.1126/science.1157707>
- Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2015. V. 96. № 12. P. 2059–2077.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Svensson A., Andersen K.K., Bigler M., Clausen H.B., Dahl-Jensen D., Davies S.M., Johnsen S.J., Muscheler R., Parrenin F., Rasmussen S.O., Röthlisberger R., Seierstad I.K., Steffensen J.P., Vinther B.M. A 60 000-year Greenland stratigraphic ice core chronology // *Climate of the Past*. 2008. V. 4. P. 47–57.
<https://doi.org/10.5194/cp-4-47-2008>
- Újvári G., Klötzli U., Stevens T., Svensson A., Ludwig P., Vennemann T., Gier S., Horschinegg M., Palcsu L., Hippler D., Kovács J., Biagio C.Di., Formenti P. Greenland Ice Core Record of Last Glacial Dust Sources and Atmospheric Circulation // *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*. 2022. V. 127. № 15. P. e2022JD036597.
<https://doi.org/10.1029/2022JD036597>
- Yasunari T.J., Shiraiwa T., Kanamori S., Fuji Yo., Igarashi M., Yamazaki K., Benson C.S., Hondoh T. Intra-annual variations in atmospheric dust and tritium in the North Pacific region detected from an ice core from Mount Wrangell, Alaska // *Journ. of Geophys. Research: Atmosphere*. 2007. V. 112. № D10. P. D10208.
<https://doi.org/10.1029/2006JD008121>
- Yasunari T.J., Yamazaki K. Impacts of Asian dust storm associated with the stratosphere-to-troposphere transport in the spring of 2001 and 2002 on dust and tritium variations in Mount Wrangell ice core, Alaska // *Atmospheric Environment*. 2009. V. 43. № 16. P. 2582–2590.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.02.025>

Citation: *Khairedinova A.G., Vinogradova M.M., Vorobyev M.A., Kutuzov S.S., Chizhova Yu.N., Zakusin S.V., Mikhlenko V.N. Characterization of mineral particles in the ice core of the Ushkovsky volcano. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2025, 65 (1): 164–178. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673425010129*

Characterization of mineral particles in the ice core of the Ushkovsky volcano

© 2025 A. G. Khairedinova^a, M. M. Vinogradova^a, M. A. Vorobyev^{a, #},
S. S. Kutuzov^b, Yu. N. Chizhova^{a, c}, S. V. Zakusin^{c, d}, V. N. Mikhlenko^a

^a*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*School of Earth Sciences, The Ohio State University, Columbus, USA*

^c*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^d*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: m.vorobyev@igras.ru*

Received November 9, 2024; revised December 13, 2024; accepted December 25, 2024

The article presents the investigation of mineral particles from an ice core obtained from Ushkovsky volcano (Kamchatka) in the fall of 2022. The 14-meter-long ice core was studied to identify the causes of mineral dust concentration variability and to determine its sources. Insoluble solid particles, including volcanic ash and mineral dust, were analyzed using stereomicroscopy and X-ray diffraction. Minimum and maximum dust concentration values were 356.4 ppb and 45 969 ppb, respectively, with an average dust mass concentration across all data at 5 099 ppb and a median of 2 784 ppb. The results show a cyclic particle distribution linked to seasonality, with notable concentration peaks likely associated with volcanic activity and the transport of mineral dust from arid regions. It was found that surface melting leads to the leaching of calcium and magnesium ions from layers containing insoluble particles. The displacement of cation peaks relative to dust concentration peaks is variable and likely depends on the meteorological characteristics of individual summer seasons. Mineralogical analysis of the samples shows the presence of plagioclase, as well as clay and ferromagnesian silicates and amorphous silica. Plagioclase dominates at all depths, indicating a predominance of volcanic ashes in the composition of insoluble impurities. The ratio of non-clay minerals (pyroxenes, amphiboles, and amorphous silica) can be used as markers of local transport, while the presence of clay minerals (smectite, kaolinite, chlorite) is suggested as an indicator of long-range transport. Thus, Kamchatka ice cores can be used to study the processes of mineral particle transport in the atmosphere, provided a comprehensive approach is applied, including mineral composition and chemical composition analyses as well as isotopic methods to determine material origin.

Keywords: ice core, mineral particles, Kamchatka, Ushkovsky

REFERENCES

- Gorbach N.V., Filosofova T.M., Mikhlenko V.N. Identification of tephra horizons in the glacier at the top of the Ushkovsky volcano (Kamchatka) by analyzing the chemical composition of volcanic glass in the ash particles. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (1): 66–80 [In Russian].
<https://doi.org/10.31857/S2076673424010053>
- Shevchenko V.P., Lisicin A.P., Vinogradova A.A., Smirnov V.V., Serova V.V., Shtain R. Arctic Aerosols: results of ten years of research // *Optika atmosfery i okeana. Optics of the atmosphere and ocean*. 2000, 13 (6–7): 551–576 [In Russian].
- de Angelis M., Barkoy N.I., Petrov V.I. Sources of continental dust over Antarctica during the last glacial cycle. *Journal of Atmospheric Chemistry*. 1992, 14: 233–244.
<https://doi.org/10.1007/BF00115236>
- Barr S.L., Wyld B., McQuaid J.B., Neely III R.R., Murray B.J. Southern Alaska as a source of atmospheric mineral dust and ice-nucleating particles. *Science Advances*. 2023, 9 (33): 3708.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.adg3708>
- Bory A.J.-M., Biscaye P.E., Piotrowski A.M., Steffensen J.P. Regional variability of ice core dust composition and provenance in Greenland – Geochemistry Geophysics Geosystems. 2003, 4 (12): 1107.
<https://doi.org/10.1029/2003GC000627>

- Bullard J.E., Baddock M., Bradwell T., Crusius J., Darlington E., Gaiero D., Gassó S., Gisladdottir G., Hodgkins R., McCulloch R., McKenna-Neuman C., Mockford T., Stewart H., Thorsteinsson T. High-latitude dust in the Earth system. *Reviews of Geophysics*. 2016, 54: 447–485. <https://doi.org/10.1002/2016RG000518>
- Chizhova Yu.N., Mikhaleiko V.N., Korneva I.A., Muravyov Ya.D., Hayredinova A.G., Vorobiev M.A. New data on deuterium excess values of glacial ice in Kamchatka Peninsula. *Doklady Earth Sciences*. 2024, 517 (2): 1387–1392. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24602190>
- Crusius J., Schroth A.W., Gassó S., Moy C.M., Levy R.C., Gatica M. Glacial flour dust storms in the Gulf of Alaska: hydrologic and meteorological controls and their importance as a source of bioavailable iron. *Geophysical Research Letters*. 2011, 38 (6): L06602. <https://doi.org/10.1029/2010GL046573>
- Doebelin N., Kleeberg R. Profex: A graphical user interface for the Rietveld refinement program BGMN. *Journal of Applied Crystallography*. 2015, 48: 1573–1580. <https://doi.org/10.1107/S1600576715014685>
- Eichler A., Schwikowski M., Gäggeler H.W. Meltwater induced relocation of chemical species in Alpine firn. *Tellus B*. 2001, 53B: 192–203. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v53i2.16575>
- Fischer H., Fundel F., Ruth U., Twarloh B., Wegner A., Udisti R., Becagli S., Castellano E., Morganti A., Severi M., Wolff E., Littot G., Röhlisberger R., Mulvaney R., Hutterli M.A., Kaufmann P., Federer U., Lambert F., Bigler M., Hansson M., Jonsell U., de Angelis M., Boutron C., Siggaard-Andersen M.-L., Steffensen J.P., Barbante C., Gaspari V., Gabrielli P., Wagenbach D. Reconstruction of millennial changes in dust emission, transport and regional sea ice coverage using the deep EPICA ice cores from the Atlantic and Indian Ocean sector of Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*. 2007, 260 (1–2): 340–354. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.06.014>
- Gow A.J., Williamson T. Volcanic ash in the Antarctic ice sheet and its possible climatic implications. *Earth and Planetary Science Letters*. 1971, 13 (1): 210–218. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(71\)90126-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(71)90126-9)
- Jones V., Solomina O. The geography of Kamchatka. *Global and Planetary Change*. 2015, 134: 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.06.003>
- Kallos G., Papadopoulos A., Katsafados P., Nickovic S. Transatlantic Saharan dust transport: Model simulation and results. *Journ. of Geophys. Research: Atmosphere*. 2006, 111 (D9): D09204. <https://doi.org/10.1029/2005JD006207>
- Koffman B.G., Yoder M.F., Methven T., Hanschka L., Sears H.B., Saylor P.L., Wallace K.L. Glacial dust surpasses both volcanic ash and desert dust in its iron fertilization potential. *Global Biogeochemical Cycles*. 2021, 35: e2020GB006821. <https://doi.org/10.1029/2020GB006821>
- Kutuzov S.S., Mikhaleiko V.N., Grachev A.M., Ginot P., Lavrentiev I.I., Kozachek A.V., Krupskaya V.V., Ekaykin A.A., Tielidze L.G., Toropov P.A. First geophysical and shallow ice core investigation of the Kazbek plateau glacier, Caucasus Mountains. *Environmental Earth Sciences*. 2016, 75: 1488. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6295-9>
- Kutuzov S., Legrand M., Preunkert S., Ginot P., Mikhaleiko V., Shukurov K., Poliukhov A., Toropov P. The Elbrus (Caucasus, Russia) ice core record – Part 2: History of desert dust deposition. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019, 19: 14133–14148. <https://doi.org/10.5194/acp-19-14133-2019>
- Lambert F., Delmonte B., Petit J., Bigler M., Kaufmann P.R., Hutterli M.A., Stocker T.F., Ruth U., Steffensen J.P., Maggi V. Dust-climate couplings over the past 800,000 years from the EPICA Dome C ice core. *Nature*. 2008, 452: 616–619. <https://doi.org/10.1038/nature06763>
- Legrand M., Mayewski P.A. Glaciochemistry of polar ice cores: A review. *Reviews of Geophysics*. 1997, 35 (3): 219–243. <https://doi.org/10.1029/96RG03527>
- Lu W., Zhao W., Balsam W., Lu H., Liu P., Lu Z., Ji J. Iron mineralogy and speciation in clay-sized fractions of Chinese desert sediments. *Journal of Geophysical Research – D: Atmospheres*. 2017, 122: 13458–13471. <https://doi.org/10.1002/2017JD027733>
- Matoba S., Ushakov S.V., Shimbori K., Sasaki H., Yamasaki T., Ovshannikov A.A., Manevich A.G., Zhideleva T.M., Kutuzov S., Muravyev Ya.D., Shiraiwa T. The glaciological expedition to Mount Ichinsky, Kamchatka, Russia. *Bulletin of Glaciological Research*. 2007, 24: 79–85. Retrieved from: <http://hdl.handle.net/2115/20566>
- Matoba S., Shiraiwa T., Tsushima A., Sasaki H., Muravyev Ya.D. Records of sea-ice extent and air temperature at the Sea of Okhotsk from an ice core of Mount Ichinsky, Kamchatka. *Annals of Glaciology*. 2011, 52 (58): 44–50. <https://doi.org/10.3189/172756411797252149>
- Muhs D.R., Budahn J.R., McGeehin J.P., Bettis III E.A., Skipp G., Paces J.B., Wheeler E.A. Loess origin, transport, and deposition over the past 10,000 years, Wrangell-St. Elias National Park, Alaska // *Aeolian Research*. 2013. V. 11. P. 85–99. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2013.06.001>
- Post J.E., Bish D.L. Rietveld refinement of crystal structures using powder X-Ray diffraction data. *Reviews in Mineralogy*. 1989, 20: 277–308. <https://doi.org/10.1515/9781501509018-012>
- Preunkert S., Legrand M., Kutuzov S., Ginot P., Mikhaleiko V., Friedrich R. The Elbrus (Caucasus, Russia) ice core record – Part 1: reconstruction of past anthropogenic sulfur emissions in south-eastern Europe. *Atmospheric*

- Chemistry and Physics. 2019, 19 (22): 14119–14132.
<https://doi.org/10.5194/acp-19-14119-2019>
- Ram M., Donarummo Jr.J., Sheridan M. Volcanic ash from Icelandic ~57 300 Yr BP eruption found in GISP2 (Greenland) Ice Core. *Geophysical Research Letters*. 1996, 23 (22): 3167–3169.
<https://doi.org/10.1029/96GL03099>
- Ruth U., Wagenbach D., Steffensen J.P., Bigler M. Continuous record of microparticle concentration and size distribution in the central Greenland NGRIP ice core during the last glacial period. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*. 2003, 108 (D3): 4098.
<https://doi.org/10.1029/2002JD002376>
- 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*. 2013, 9: 2153–2181.
<https://doi.org/10.5194/cpd-9-2153-2013>
- Shiraiwa T., Nishio F., Kameda T., Takahashi A., Toyama Y., Muravyev Ya.D., Ovsyannikov A.A. Ice core drilling at Ushkovsky ice cap, Kamchatka, Russia. *Seppyo*. 1999, 61 (1): 25–40.
<https://doi.org/10.5331/seppyo.61.25>
- Steffensen J.P., Andersen K.K., Bigler M., Clausen H.B., Dahl-Jensen D., Fischer H., Goto-Azuma K., Hansson M.E., Johnsen S.J., Jouzel J., Masson-Delmotte V., Popp T., Rasmussen S.O., Rothlisberger R., Ruth U., Stauffer B., Siggaard-Andersen M.-L., Sveinbjörnsdóttir A.E., Svensson A., White J.W.C. High-resolution Greenland ice core data show abrupt climate change happens in few years. *Science*. 2008, 321 (5889): 680–684.
<https://doi.org/10.1126/science.1157707>
- Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2015, 96 (12): 2059–2077.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Svensson A., Andersen K.K., Bigler M., Clausen H.B., Dahl-Jensen D., Davies S.M., Johnsen S.J., Muscheler R., Parrenin F., Rasmussen S.O., Röthlisberger R., Seierstad I.K., Steffensen J.P., Vinther B.M. A 60 000-year Greenland stratigraphic ice core chronology. *Climate of the Past*. 2008, 4: 47–57.
<https://doi.org/10.5194/cp-4-47-2008>
- Újvári G., Klötzli U., Stevens T., Svensson A., Ludwig P., Vennemann T., Gier S., Horschinegg M., Palcsu L., Hippler D., Kovács J., Biagio C.Di., Formenti P. Greenland Ice Core Record of Last Glacial Dust Sources and Atmospheric Circulation. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*. 2022, 127 (15): e2022JD036597.
<https://doi.org/10.1029/2022JD036597>
- Yasunari T.J., Shiraiwa T., Kanamori S., Fuji Yo., Igarashi M., Yamazaki K., Benson C.S., Hondoh T. Intra-annual variations in atmospheric dust and tritium in the North Pacific region detected from an ice core from Mount Wrangell, Alaska. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*. 2007, 112 (D10): D10208.
<https://doi.org/10.1029/2006JD008121>
- Yasunari T.J., Yamazaki K. Impacts of Asian dust storm associated with the stratosphere-to-troposphere transport in the spring of 2001 and 2002 on dust and tritium variations in Mount Wrangell ice core, Alaska. *Atmospheric Environment*. 2009, 43 (16): 2582–2590.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.02.025>