

УДК 551.21+551.32

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГОРИЗОНТОВ ТЕФРЫ В ЛЕДНИКЕ НА ВЕРШИНЕ ВУЛКАНА УШКОВСКИЙ (КАМЧАТКА)

© 2024 г. Н. В. Горбач^{1,2*}, Т. М. Философова¹, В. Н. Михаленко²

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия

* e-mail: n_gorbach@mail.ru

Для определения источников тефры в ледовом керне, полученном в 2022 г. при бурении ледника в кратере вулкана Ушковский на Камчатке, использован анализ химического состава вулканического стекла в пепловых частицах. Сравнение полученных данных с опубликованными данными по составу стёкол тефры современных извержений вулканов Камчатки позволило определить принадлежность каждого горизонта тефры к конкретному вулкану-источнику.

Поступила в редакцию 09.11.2023 г.

После доработки 26.11.2023 г.

Принята к публикации 31.03.2024 г.

Ключевые слова: тефра, вулканическое стекло, ледовый керн, энергодисперсионный анализ; вулкан Ушковский, Камчатка

DOI: 10.31857/S2076673424010053

ВВЕДЕНИЕ

Ледники и ледниковые покровы, существующие на протяжении сотен и тысяч лет, служат надёжным архивом летописи эксплозивных извержений. Расшифровка таких архивов и их датирование позволяют не только уточнить хронологию и параметры извержений, но и получить информацию для смежных научных областей — реконструкций

палеоклиматических флуктуаций, процессов загрязнения атмосферы и пр. (Lowe et al., 2012; Lane et al., 2013; Cook et al., 2022). В настоящее время существует целый ряд сводок палеовулканической активности, составленных по данным анализа кернов льда, которые постоянно уточняются с появлением новых данных (Cole-Dai et al., 2000; Lin et al., 2022; Plunkett et al., 2023). Ранее они были основаны прежде всего на измерении общей



Рис. 1. Вулкан Ушковский в окружении крупнейших вулканов Ключевской группы, вид с юго-востока в августе 2023 г. Фото В. И. Фролова. На врезке показана региональная позиция вулкана.

Fig. 1. Ushkovsky volcano surrounded by the largest volcanoes of the Klyuchevskoi group, view from the southeast in August, 2023. Photo by V. I. Frolov. The inset shows the regional position of the volcano.

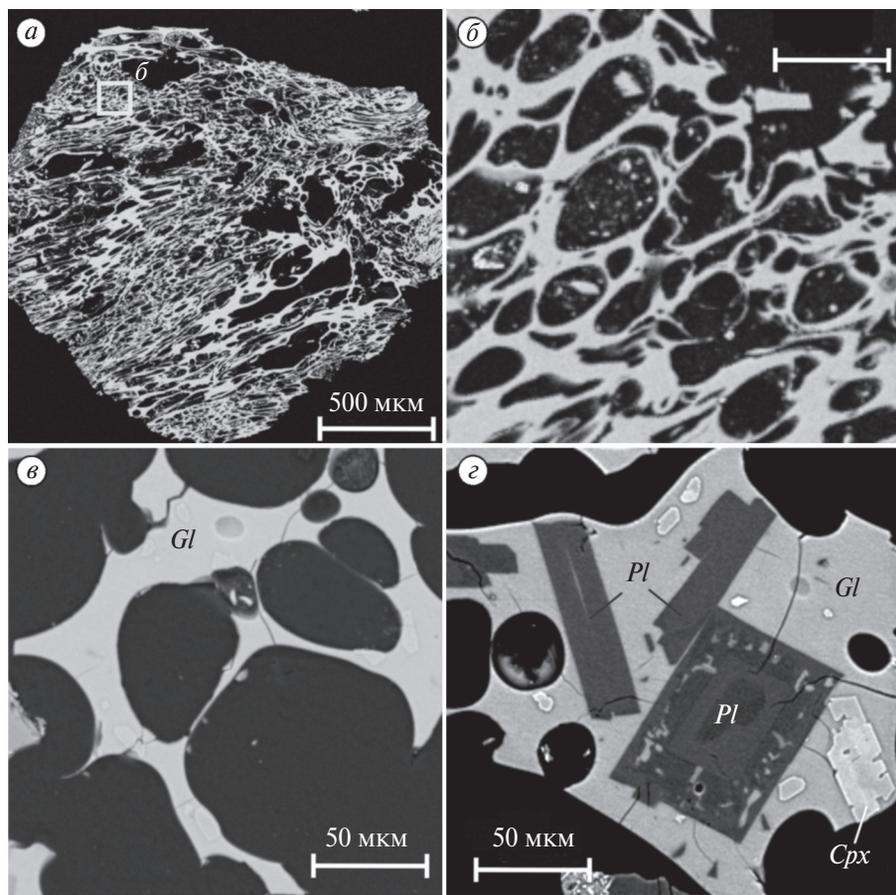


Рис. 2. Примеры облика пепловых частиц, полностью (*a–v*) или частично (*z*) сложенных вулканическим стеклом: *a* — частица пемзы из почвенно-пирокластического чехла в районе вулкана Жупановский, Камчатка; *b* — увеличенный фрагмент пемзы; *v* — оскольчатая частица стекла продуктов извержения вулкана Ключевской; *z* — стекловатая частица с микролитами пироксенов и плагиоклаза, вулкан Ключевской. Изображения приведены в режиме отраженных электронов: *Cpx* — клинопироксен; *Pl* — плагиоклаз; *Gl* — стекло.

Fig. 2. Examples of ash particles completely (*a–v*) or partially (*z*) composed of volcanic glass: *a* — pumice particle from the soil profile in the area of Zhupanovsky volcano, Kamchatka; *b* — enlarged fragment of pumice; *v* — glass shard from the tephra from Kliuchevskoi volcano; *z* — glassy particle with microclites of pyroxenes and plagioclase, Kliuchevskoi volcano. Images are shown in the back-scattered electron mode: *Cpx* — clinopyroxene; *Pl* — plagioclase; *Gl* — glass.

электропроводности и диэлектрической проницаемости льда либо на измерениях концентрации сульфатов. Однако в последние годы было показано, что пики повышенной концентрации сульфатов в кернах далеко не всегда сопровождаются ростом электропроводности льда, что приводит к большим сложностям при идентификации отдельных извержений (Mikhailenko et al., 2023). Поэтому наиболее надёжными маркерами вулканических извержений в ледниках служат не пики концентрации сульфатов, при анализе которых трудно отделить вулканогенную составляющую от невулканической, а находки самих частиц тефры (Abbot, Davies, 2012; Cook et al., 2018). Идентификация источников тефры и её временная привязка к известным или датированным эруптивным событиям позволяет получить хроностратиграфические маркеры, на основе которых может быть разработана

возрастная шкала при датировании ледниковых толщ. Например, геохимические исследования частиц вулканического стекла позволили идентифицировать в гренландских ледовых кернах тефру трещинного извержения Лаки (Исландия) в 1783/84 г. и использовать эту дату для разработки ледовой хронологической шкалы GICC21 с разрешением один год для последних 3800 лет (Fiacco et al., 1994; Sinnl et al., 2022).

Ледник, залегающий на высоте 3900 м в кратере Горшкова вулкана Ушковский на Камчатке, является идеальным местом для подобных исследований (Shiraiwa et al., 2001; Муравьев и др., 2007). Вулкан Ушковский (или сопка Плоская Дальняя, рис. 1) входит в состав крупнейшей на полуострове Ключевской группы вулканов и соседствует с наиболее активными вулканами — Ключевским,

Безыманным, Толбачиком. Мощность ледника составляет около 250 м (Shiraiwa et al., 2001). Ранее в ледовом керне, полученном российско-японской экспедицией в 1996–1998 гг., было выделено 354 горизонта захороненной тефры (Муравьев и др., 2007). На основе анализа валового химического состава образцов пеплов и микроскопического описания лишь девять из выделенных горизонтов удалось предположительно привязать к вулканам-источникам.

В данной работе исследованы видимые горизонты тефры и интервалы льда с рассеянными пепловыми частицами, обнаруженные в четырнадцати метрах ледового керна, полученного при бурении ледника вулкана Ушковский в сентябре 2022 г. Для идентификации источников пеплов был использован анализ химического состава вулканического стекла в отдельных пепловых частицах. Такой анализ является эффективным инструментом тефрохронологических исследований (Lowe et al., 2017; Ponomareva et al., 2017; Portnyagin et al., 2020; Cook et al., 2022). Вулканическое стекло (см. рис. 2, а–з) сохраняет геохимические характеристики своего магматического источника, а современные методы локального анализа вещества позволяют выполнить точные определения этих характеристик в отдельных частицах тефры (Kuehn et al., 2011; Lowe et al., 2017; Portnyagin et al., 2020). За последнее десятилетие на Камчатке были геохимически охарактеризованы составы вулканических стёкол современных и исторических извержений, датированных продуктов извержений активных голоценовых вулканов, а также ряда крупнейших эксплозивных извержений плейстоцена (Пономарева и др., 2012; Горбач и др., 2018; Portnyagin et al., 2020; Ponomareva et al., 2015; 2017; 2021). Использование этих данных для сравнения и корреляций при изучении новых разрезов тефры, в том числе и захороненных в ледниках, предоставляет возможность уверенно идентифицировать конкретные вулканы-источники. В том случае, когда удаётся точно идентифицировать источник и сопоставить последовательность слоёв нового разреза с уже датированными слоями в других разрезах или с уже известными и хорошо задокументированными современными эруптивными событиями, открывается возможность определить возраст слоя, а соответственно, и вмещающих его отложений.

Массовый анализ химического состава вулканических стёкол в новых разрезах требует корректного сопоставления с уже проанализированными и опубликованными составами. В нашей работе составы вулканических стёкол из горизонтов тефры, захороненной в ледовом керне, были получены при помощи энергодисперсионного анализа на сканирующем электронном микроскопе Vega 3 Tescan в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Точность анализа была протестирована на

основе анализа 11 международных аттестованных стандартных образцов вулканических и синтетических стёкол. Результаты анализа вулканических стёкол обработаны с учётом рекомендаций из работ (Kuehn et al., 2011; Portnyagin et al., 2020). Сопоставление полученных нами данных с опубликованными составами вулканических стёкол тефры современных извержений вулканов Камчатки совместно с анализом информации о распространении пепловых шлейфов в ходе этих извержений позволило уверенно определить источники каждого из пепловых горизонтов, захороненных в леднике в кратере вулкана Ушковский.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ

14-метровый керн льда, вмещающий пеплы, был получен сотрудниками Института географии РАН (ИГ РАН) в сентябре 2022 г. при бурении ледника, залегающего на высоте 3900 м в кратере Горшкова на вулкане Ушковский. Этот керн в замороженном состоянии доставлен в холодную лабораторию ИГ РАН, где из него отобрано три образца из наиболее мощных пепловых горизонтов. Образцы тефры из ещё четырёх маломощных слоёв и трёх интервалов льда с рассеянными пепловыми частицами с глубин от 89–94 до 926–933 см были собраны на фильтры после таяния льда. Номера образцов соответствуют глубине их залегания в ледовом керне в сантиметрах. В ходе пробоподготовки образцы пеплов, извлечённых из ледового керна, помещались в формы из оргстекла и заливались эпоксидной смолой. После отвердевания препараты были отполированы на алмазных пастиках и покрыты углеродным напылением.

Определение содержаний главных компонентов (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K и P) в вулканических стёклах было выполнено в ИВиС ДВО РАН при помощи сканирующего электронного микроскопа Vega 3 Tescan, оборудованного энергодисперсионным спектрометром Oxford X-max80mm² и программным обеспечением AZtec. В качестве первичных стандартов были использованы природные и синтетические силикаты и оксиды: санидин для Si, Na, Al, K; диопсид для Ca; периклаз для Mg; пирит для Fe; рутил для Ti и родонит для Mn. Условия анализа составили: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток на эталоне никеля ~0.7–0.75 нА, время накопления спектров 10 с и диаметр электронного пучка 5 мкм. Для контроля качества анализов были использованы образцы вулканических и синтетических стёкол, составы которых опубликованы в работах (Jarosewich, 1980; Jochum et al., 2005; 2006) и применяются в качестве международных стандартов для сопоставления данных, полученных в разных лабораториях. Для каждого стандартного образца вулканического или синтетического стекла было получено от 9 до 15 анализов (всего 128 анализов). Результаты анализа стандартных образцов приведены

в таблице S1 (дополнительные материалы: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.24481843.v2>).

Анализ вулканических стёкол в частицах пеплов из ледникового керна проводился совместно со стандартными образцами андезибазальта BCR-2G (Jochum et al., 2006) и риолита АТНО-2G (Jochum et al., 2005). Стандартные образцы анализировались в начале работы, через каждые 40–50 анализов и при завершении аналитической сессии (таблица S2 дополнительных материалов: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.24481843.v2>). Всего было получено около 470 анализов (таблица S3 дополнительных материалов: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.24481843.v2>).

Обработка полученных данных выполнена по методике, которая применяется при массовом анализе состава вулканических стёкол тефры Камчатки (Portnyagin et al., 2020; Popomareva et al., 2021) и положена в основу тефростратиграфических корреляций. В первую очередь на основе сравнения измеренных составов стандартных образцов с референсными значениями из работ (Jochum et al., 2005, 2006) рассчитывались поправочные коэффициенты, учитывающие возможность сдвига калибровки за время анализа. После применения поправочных коэффициентов из рассмотрения исключались анализы с низкой суммой оксидов (менее 95 мас.%), а также анализы, сделанные с захватом минеральных фаз (плагиоклаза, пироксенов и магнетита), что определялось по избыточным содержаниям Al_2O_3 , CaO или $FeO^{общ}$ по сравнению с преобладающим составом стёкол в образце. Для построения графиков и сопоставления с опубликованными ранее составами все анализы стёкол приводились к сумме оксидов 100%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности минерального состава пеплов из ледового керна. Пеплы, извлечённые из ледового керна (рис. 3, *a–b*), в сухом состоянии имели различный цвет — от чёрного до светло-серого. Под бинокулярным микроскопом пеплы обнаружили различия по минеральному составу, крупности обломков, а также по соотношению грубой и пылевой фракций. Большинство образцов было сложено остроугольными частицами чёрного пористого вулканического стекла и/или угловатыми буроватыми стекловатыми частицами с микролитами плагиоклаза, пироксенов и округлыми зёрнами оливина. Преобладающий размер таких частиц — 200–300 мкм (см. рис. 3, *в–e*). В тонкой фракции (> 100 мкм) таких образцов, кроме фрагментов стекловатых частиц отмечалось существенное количество мельчайших зёрен магнетита. Несколько образцов состояло из обломков плагиоклаза и пироксенов и частиц с зеленоватым оттенком стекла. Один из образцов (Ush 762–777) содержал

смешанную популяцию, в которой отмечены чёрные оскольчатые частицы, стекловатые частицы зеленоватого оттенка и частицы с прозрачным бесцветным стеклом, микролитами плагиоклаза и редкими выделениями амфибола.

Тестирование точности анализа состава вулканических стёкол. Для тестирования точности анализа на сканирующем электронном микроскопе Vega 3 Tescan было выполнено измерение составов международных стандартных образцов вулканических и синтетических стёкол с диапазоном составов от базальтов до риолитов. На рис. SA дополнительных материалов (<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.24481843.v2>) показано сопоставление полученных нами составов и референсных составов этих же образцов, опубликованных в работах (Jarosewich, 1980; Jochum et al., 2005; 2006). Наибольшую сходимость измеренных и референсных значений показывают концентрации титана, железа, магния и кальция. Измеренные содержания SiO_2 чуть завышены, а Al_2O_3 несколько занижены по отношению к аттестованным значениям. Как показано в работе (Kuehn et al., 2011), такая особенность типична для энергодисперсионного анализа. Однако следует отметить, что величина стандартных отклонений при анализе содержаний SiO_2 (0.15–0.62 мас.%) и Al_2O_3 (0.08–0.33 мас.%) (см. табл. S1 дополнительных материалов: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.24481843.v2>) не превышает аналогичные данные, полученные при межлабораторном сравнении результатов измерений состава вулканического стекла (табл. 1 и 3 из работы Kuehn et al., 2011).

Содержания калия и натрия систематически завышены на ~10% относительно референсных значений, что требует использования поправочного коэффициента.

Результаты анализа химического состава вулканических стёкол пеплов из ледового керна. Для каждого из образцов пеплов из ледового керна было получено от 27 до 45 анализов вулканического стекла в индивидуальных пепловых частицах (см. табл. S3 дополнительных материалов: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.24481843.v2>). Полученные данные показывают значительные вариации содержаний оксидов (в мас.%): SiO_2 от 54.44 до 80.59, TiO_2 от 0.18 до 2.61, Al_2O_3 от 10.68 до 15.55, $FeO^{общ}$ от 1.11 до 13.98, MgO от 0.06 до 4.40, CaO от 0.46 до 7.85, Na_2O от 2.58 до 4.80, K_2O от 0.89 до 4.13. На классификационной диаграмме $SiO_2-Na_2O+K_2O$ (Le Bas et al., 1986) точки составов вулканических стёкол покрывают диапазон от андезибазальтов до риолитов и формируют три отчетливо выраженные группы (рис. 4, *a*). Первая группа андезибазальтовых-андезитовых (SiO_2 от 54.44 до 60.81 мас.%) составов наиболее представительна и формирует компактное поле точек; вторая группа преимущественно дацитового

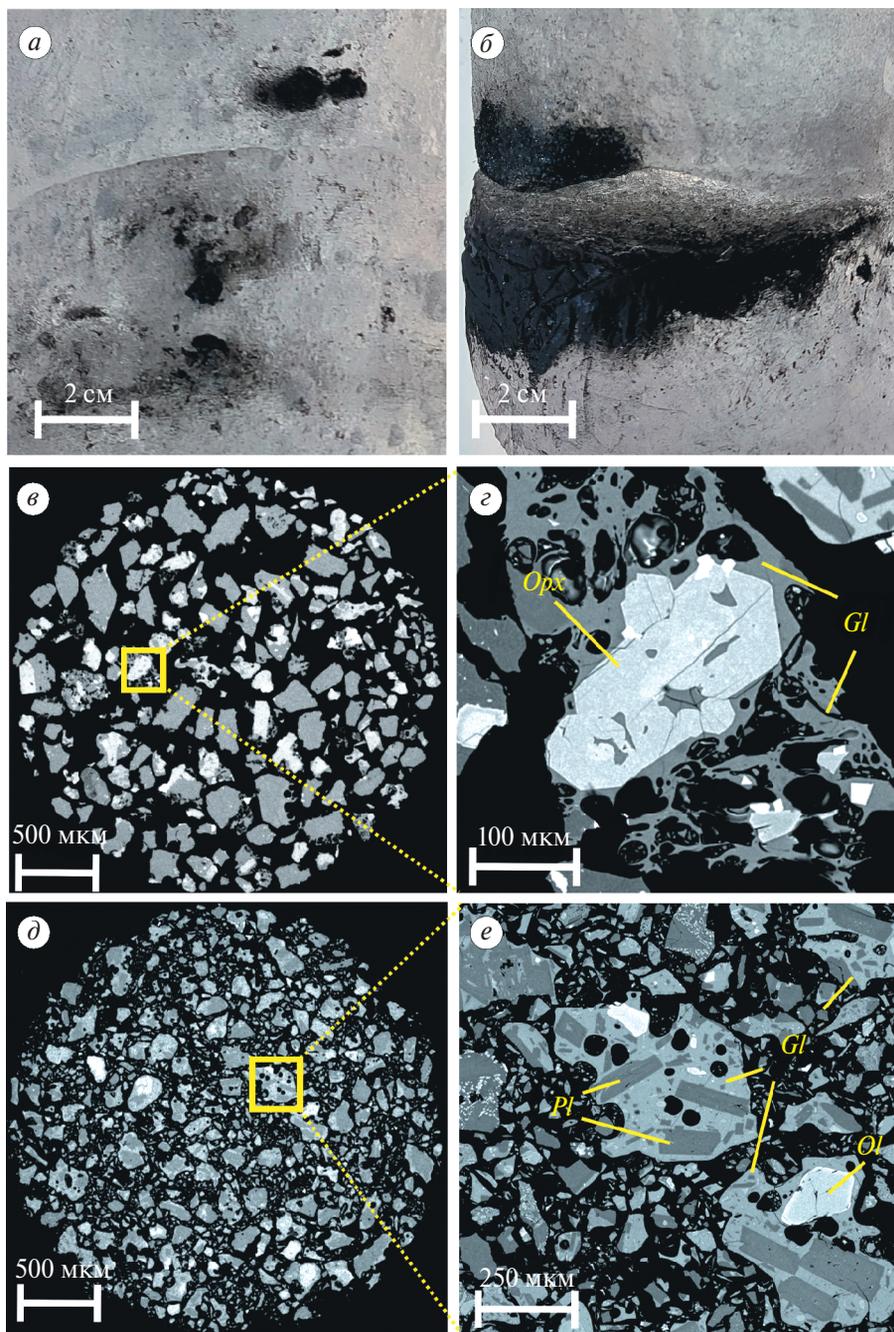


Рис. 3. Примеры образцов пеплов, захороненных в леднике вулкана Ушковский: *a* — фрагмент ледового ядра, вмещающего тефру на глубине 762–777 см (образец Ush 762–777); *b* — фрагмент ледового ядра, вмещающего тефру на глубине 828–834 см (образец Ush 828–834); *c* — облик пепловых частиц из образца Ush 762–777; *e* — стекловатая сильно пористая пепловая частица образца Ush 762–777 с вкрапленником ортопироксена (*Opx*), состав стекла (*Gl*) отвечает продуктам извержений вулкана Безымянный; *d* — облик пепловых частиц из образца Ush 828–834; *e* — стекловатые частицы пепла образца Ush 828–834 с микролитами пироксенов, плагиоклаза и оливина, вулкан Ключевской.

Fig. 3. Examples of ash layers buried in the Ushkovsky Glacier: *a* — fragment of ice core containing tephra at the depth 762–777 cm (sample Ush 762–777); *b* — fragment of ice core containing tephra at the depth 828–834 cm (sample Ush 828–834); *c* — ash particles from the Ush 762–777 sample; *e* — glassy, highly porous ash particle from the Ush 762–777 sample with a phenocryst of orthopyroxene (*Opx*), glass composition (*Gl*) corresponds to the products of eruptions of the Bezmyannyi volcano; *d* — ash particles from the Ush 828–834 sample; *e* — glassy ash particles from the Ush 828–834 sample with microlites of pyroxenes, plagioclase and olivine, Kliuchevskoi volcano.

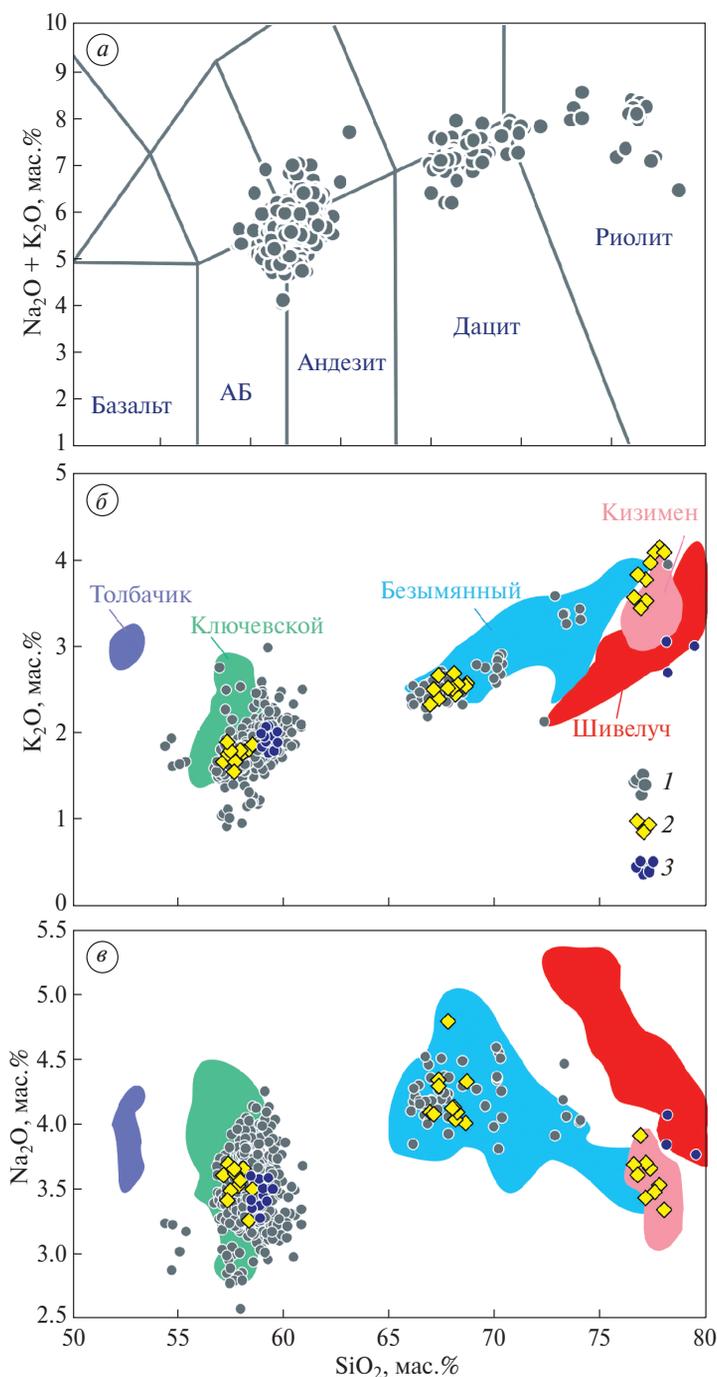


Рис. 4. Составы вулканических стёкол пеплов из ледового ядра на классификационной диаграмме $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (Le Bas et al., 1986) (a) и на графиках вариаций содержания оксидов натрия (б) и калия (в) относительно содержания кремнекислоты: 1 — точки составов стёкол всех изученных образцов; 2 — точки составов стёкол из образца Ush 762–777 со смешанной популяцией частиц продуктов извержений вулканов Кизимен, Ключевской и Безымянный; 3 — точки составов стёкол из образца Ush 348–354 со смешанной популяцией частиц пеплов вулканов Ключевской и Шивелуч. Поля составов стёкол продуктов современных извержений вулканов Камчатки показаны различными цветами на основе данных из работ (Пономарева и др., 2012; Горбач и др., 2016, 2022; Portnyagin et al., 2020; Davydova et al., 2022).

Fig. 4. Volcanic glass compositions from the ice core tephras on the $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ classification diagram (Le Bas et al., 1986) (a) and on the diagrams of variations of sodium (b) and potassium (v) oxide contents in relation to the silica content: 1 — points of glass compositions of all studied samples; 2 — points of glass compositions from sample Ush 762–777 with mixed population of particles from eruptions of Kizimen, Kliuchevskoi and Bezemyannyi volcanoes; 3 — points of glass compositions from sample Ush 348–354 with mixed population of particles of ash from Kliuchevskoi and Shiveluch volcanoes. The fields of glass compositions of products of modern volcanic eruptions in Kamchatka are shown in different colours based on data from (Ponomareva et al., 2012; Gorbach et al., 2016; 2022; Portnyagin et al., 2020; Davydova et al., 2022).

состава (до низко-Si риолитов, SiO_2 от 65.97 до 73.97 мас.%) образует протяжённый тренд. Третья, самая малочисленная группа составов отвечает высоко-Si риолитам ($\text{SiO}_2 \geq 75$ мас.%).

Большая часть образцов гомогенны по составу стёкол, однако в двух образцах были обнаружены смешанные популяции. Так, в образце Ush 348–354 наряду с преобладающими частицами, состав стёкол которых отвечает андезибазальтам, присутствуют единичные частицы с риолитовым составом стёкол, а образец Ush 762–777 содержит три группы стёкол, дискретные по составу (см. рис. 4, б–в).

Идентификация источников пеплов в ледовом керне на основе состава вулканического стекла. Для определения вулканов-источников полочные составы стёкол пепловых частиц были сопоставлены с опубликованными данными по составу стёкол современных извержений вулканов Камчатки (Пономарева и др., 2012; Горбач и др., 2016; 2022; Portnyagin et al., 2020; Davydova et al., 2022). Основываясь на оценке скорости аккумуляции льда в кратере вулкана Ушковский ~ 0.6 м/год (Shiraiwa et al., 2001; Муравьев и др., 2007), формирование 14 м льда могло происходить около 20 лет. Исходя из этого предположения, для сопоставления были выбраны составы стёкол тех вулканов, которые проявляли эксплозивную активность с начала текущего столетия, а их эруптивные облака распространялись в сторону ледника вулкана Ушковский (Гирина и др., 2018; Озеров и др., 2020).

В число потенциальных источников пеплов вошли вулканы Ключевской и Безымянный — наиболее активные среди камчатских вулканов и ближайшие к кратерному леднику, а также вулкан Шивелуч, для которого были типичны пароксизмальные эксплозивные извержения, и вулкан Кизимен, извержение которого в 2010 г. началось с мощных эксплозий. Кроме того, для сравнения были использованы составы стёкол тефры раннего этапа трещинного Толбачинского извержения в 2012–2013 гг. (Melnikov, Volynets, 2015).

На диаграмме $\text{SiO}_2\text{—K}_2\text{O}$ (см. рис. 4, б) видно, что группа стёкол андезибазальтового и андезитового составов попадает в поле стёкол извержений Ключевского вулкана, приведённых в работах (Пономарева и др., 2012; Portnyagin et al., 2020; Горбач и др., 2022). Принадлежность этой группы стёкол к продуктам извержения Ключевского вулкана подтверждается и особенностями минерального состава пеплов с типичной для базальтов-андезиобазальтов этого вулкана оливин-пироксен-плагиоклазовой ассоциацией субквартенников и микролитов (Озеров, 2019; Горбач и др., 2022). К этой группе отнесены вулканические стёкла 9 изученных образцов.

Группа стёкол, формирующая протяжённый тренд в интервале содержаний SiO_2 от ~ 65 до ~ 75 мас.%, совпадает с полем составов стёкол

вулкана Безымянный по данным работ (Portnyagin et al., 2020; Davydova et al., 2022). Составы стёкол двух образцов пеплов попадают в поле указанных составов. Это образец Ush 89–94 — самый верхний из слоёв пеплов, захороненных в ледовом керне, и одна из популяций частиц в образце Ush 762–777 (см. рис. 4, б–в).

Пепловые частицы, состав вулканического стекла которых отвечает высоко-Si риолитам, попадают в поля составов стёкол современных извержений вулканов Шивелуч и Кизимен (Ponomareva et al., 2015; Горбач и др., 2016; Auer et al., 2018; Portnyagin et al., 2020). Несмотря на то что при близком содержании SiO_2 стекла вулкана Кизимен чуть более обогащены калием относительно стёкол вулкана Шивелуч, на диаграмме $\text{SiO}_2\text{—K}_2\text{O}$ поля составов стёкол этих двух вулканов частично пересекаются (см. рис. 4, б). Минеральный состав продуктов современных извержений обоих вулканов также близок и представлен амфибол-плагиоклазовой ассоциацией (Auer et al., 2018; Gorbach et al., 2020). Различить вулканические стёкла этих двух объектов возможно по содержанию Na_2O — стекла вулкана Шивелуч в большей степени обогащены натрием относительно стёкол вулкана Кизимен (см. рис. 4, в). Основываясь на этом критерии, пепловые частицы, присутствующие в образце Ush 762–777, отнесены к продуктам извержения вулкана Кизимен. На диаграммах $\text{SiO}_2\text{—K}_2\text{O}$ и $\text{SiO}_2\text{—Na}_2\text{O}$ (см. рис. 4, б–в) в поле составов стёкол вулкана Шивелуч попадает только четыре частицы (образец Ush 348–354) из 470 проанализированных частиц.

Распределение пеплов в ледовом керне и временная привязка отдельных горизонтов. На рис. 5 показано положение горизонтов пеплов в разрезе ледового керна. Видно, что практически во всех горизонтах пеплов (за исключением верхнего) доминируют пеплы вулкана Ключевской. Такое распределение закономерно — Ключевской является наиболее продуктивным среди активных вулканов Камчатки, а расстояние от его вершинного кратера до ледника не превышает 10 км. Так, только с начала текущего столетия на Ключевском было зафиксировано не менее 15 эруптивных событий, а с 1697 г. — начала исторической летописи по (Влодавец, Пийп, 1957; Гушенко, 1979) — число извержений приближается к семидесяти. Доступные данные по составам вулканических стёкол современных эруптивных событий (Пономарева и др., 2012; Portnyagin et al., 2020; Горбач и др., 2022) не показывают значимых вариаций от извержения к извержению, что не позволяет привязать отдельные горизонты к конкретному событию и тем самым получить временную привязку горизонтов ледового керна.

Вулкан Безымянный также занимает близкую позицию к кратерному леднику — его вершина расположена в 15 км к юго-востоку (рис. 5, врезка). Вулкан отличается высокой частотой эксплозивных извержений (например, Girina et al., 2013).

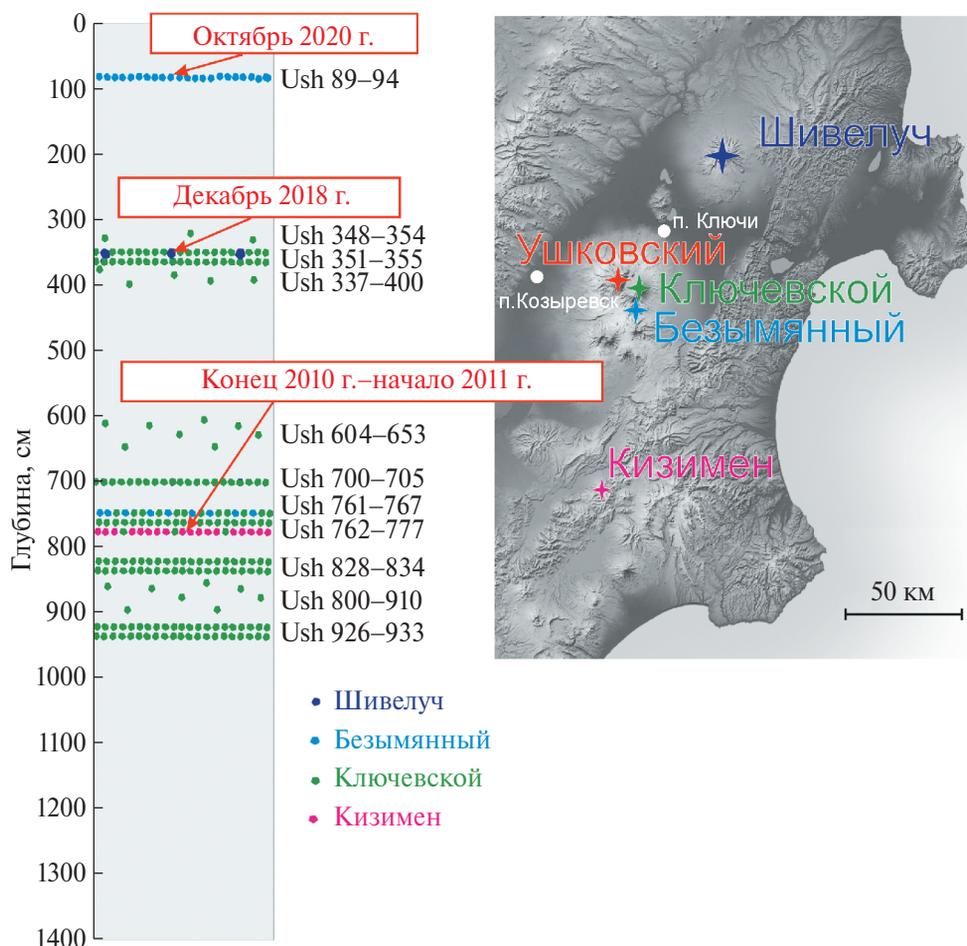


Рис. 5. Распределение отдельных горизонтов тephры в разрезе ледового ядра. Пепловые частицы, принадлежащие различным вулканам-источникам, выделены различным цветом. Обоснование времени отложения пеплов приводится в тексте. На врезке показаны вулканы-источники тephры, захороненной в верхних горизонтах ледника вулкана Ушковский.

Fig. 5. Distribution of individual tephra horizons in the ice core section. Ash particles from different volcanoes are shown in different colours. The time of ash deposition is explained in the text. The inset shows the volcanoes whose tephtras buried in the upper horizons of Ushkovsky Glacier.

Пепловые шлейфы от извержений чаще всего распространяются на восток и только изредка — на запад и северо-запад в сторону кратерного ледника вулкана Ушковский. К примеру, среди извержений 2000-х годов, для которых при помощи спутникового мониторинга и систем видеонаблюдения были зафиксированы направления, протяжённость и площадь распространения пепловых шлейфов (Гирина и др., 2018; Озеров и др., 2020), таких извержений всего шесть из тридцати (в 2000, 2009, 2011, 2017, 2019 и 2020 гг.). Учитывая глубину залегания 89–94 см и среднюю скорость аккумуляции льда 0.6 м/год, можно предположить, что горизонт пеплов Ush 89–94 мог быть сформирован при извержении в октябре 2020 г., когда эруптивные облака могли распространяться в сторону кратерного ледника (Гирина и др., 2021).

Вулкан Кизимен, пепловые частицы которого были обнаружены в составе смешанной популяции пеплов образца Ush 762–777, расположен в ~100 км к юго-западу от кратерного ледника вулкана Ушковский (см. рис. 5, врезка). С 2010 по 2013 г. на вулкане происходило масштабное эксплозивно-эффузивное извержение (Мельников и др., 2011; Малик и др., 2012; Гирина и др., 2014, 2018). Согласно работе (Мельников и др., 2011) кульминация эксплозивной активности пришлась на конец 2010 — начало 2011 г., когда протяжённые (≥ 500 км) эруптивные облака распространялись в том числе и в северо-западном направлении. В середине декабря в пос. Козыревск (примерно 110 км к ССЗ от вулкана Кизимен и в 35 км к ЮЗ от вершины вулкана Ушковский) было отмечено выпадение светло-серого пепла алевритовой размерности (Мельников и др., 2011). Пепел, выпавший

в декабре в районе пос. Козыревск, был проанализирован и охарактеризован в работе (Пономарева и др., 2012). Было подтверждено, что состав стёкол пепловых частиц отвечает продуктам извержения вулкана Кизимен, а кроме того, было обнаружено, что образец пепла, отобраный со снега, содержит примесь частиц вулкана Ключевской. В смешанной популяции частиц образца из ледового керна Ush 762–777 также присутствуют частицы пеплов вулканов Кизимен и Ключевской (см. рис. 4, в), поэтому конец 2010 — начало 2011 г. можно считать наиболее вероятным временем выпадения этого пепла на лёд. Не противоречит этому выводу и присутствие в составе смешанной популяции образца Ush 762–777 частиц пеплов вулкана Безымянный. Более того, в образце Ush 761–767, который частично дублирует образец Ush 762–777 и отвечает его верхней части, обнаружены пепловые частицы только вулканов Ключевской и Безымянный. Это означает, что пепел Кизимена был отложен ранее, а впоследствии перекрыт пеплами извержений Ключевского и Безымянного. По данным (Гирина и др., 2018; Озеров и др., 2020), извержение вулкана Ключевской происходило субсинхронно извержению вулкана Кизимен в декабре 2010 г., а извержение вулкана Безымянный с распространением пепловых шлейфов к СЗ, в сторону кратерного ледника, произошло несколькими месяцами позже — в апреле 2011 г.

Вулкан Шивелуч, единичные пепловые частицы которого были идентифицированы в образце Ush 348–354, удалён на 80 км к северу от кратерного ледника (см. рис. 5, врезка). В силу высокой частоты извержений данный объект по праву считается наиболее активным эксплозивным вулканом Камчатки (например, Ponomareva et al., 2015). Только с начала текущего столетия на вулкане произошло около 10 пароксизмальных извержений с разном пепла на расстоянии от 500 до 1000 и более километров (Озеров и др., 2020). В большинстве случаев пепловые шлейфы Шивелуча распространялись на восток, северо-восток (Гирина и др., 2018), и только для отдельных событий было зафиксировано их распространение к югу и юго-западу, в сторону вулкана Ушковский. Так, распространение пепловых шлейфов в южном направлении с выпадением пепла в посёлках Ключи и Козыревск было отмечено в июне 2013 г. и в декабре 2018 г. (Гирина и др., 2014; Маневич и др., 2019). Учитывая предполагаемый возраст слоя Ush 89–94 (октябрь 2020 г.), частицы образца Ush 348–354 могут принадлежать к извержению вулкана Шивелуч в декабре 2018 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа химического состава вулканических стёкол на сканирующем электронном

микроскопе Vega 3 Tescan позволили определить принадлежность пеплов, захороненных в кратерном леднике вулкана Ушковский, к конкретным вулканам-источникам. Основным источником является вулкан Ключевской — самый близкий к леднику и наиболее продуктивный среди вулканов Камчатки. В двух горизонтах определены пепловые частицы, принадлежащие продуктам извержений вулкана Безымянный. В одном из горизонтов была обнаружена смешанная популяция частиц, в числе которых определены частицы пеплов вулканов Кизимен, Ключевской и Безымянный. Анализ опубликованных данных по хронологии и распространению пепловых шлейфов современных извержений вулканов Камчатки позволил уверенно соотнести горизонт Ush 762–777 с начальной фазой извержения вулкана Кизимен в конце 2010 — начале 2011 г. Пепел образца Ush 89–94, слагающий самый верхний из слоёв, захороненных в леднике, принадлежит извержению вулкана Безымянный, которое, наиболее вероятно, произошло в октябре 2020 г. Единичные частицы с риолитовым составом стекла в образце Ush 348–354 могут принадлежать извержению вулкана Шивелуч в декабре 2018 г.

Результаты нашей работы могут быть использованы для дальнейшей разработки хронологической шкалы ледниковых толщ в кратере вулкана Ушковский, а методический опыт данной работы может быть использован при идентификации источников тефры неустановленных источников в разрезах четвертичных отложений.

Благодарности. Авторы признательны М. В. Портнягину (GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research) и В. Д. Щербакову (МГУ им. М. В. Ломоносова) за предоставление международных аттестованных образцов вулканических и синтетических стёкол, позволивших оценить возможности анализа на приборе Vega 3 Tescan.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 22-17-00159 “Реконструкция условий окружающей среды на Камчатке за последнее тысячелетие на основе исследований ледникового керна и других косвенных данных”; аналитические исследования проведены в рамках темы НИР № 0282-2019-0004 Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

Acknowledgments. We are grateful to M. V. Portnyagin (GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research), and V. D. Shcherbakov (Lomonosov Moscow State University) for providing standard samples of volcanic and synthetic glass that allowed us to evaluate the capabilities of analysis on the Vega 3 Tescan instrument.

The work was supported by RSF grant 22-17-00159 “Reconstruction of environmental conditions in Kamchatka over the last millennium based on studies of glacial cores and other indirect data”; analytical studies were carried out within the framework of the

research project No. 0282-2019-0004 of the Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

ЛИТЕРАТУРА

- Влодавец В. И., Пийт Б. И.* Каталог действующих вулканов Камчатки // Бюллетень вулканологических станций. М.: АН СССР, 1957. № 25. С. 5–95.
- Гирина О. А., Лупян Е. А., Сорокин А. А., Мельников Д. В., Романова И. М., Кашицкий А. В., Уваров И. А., Мальковский С. И., Королев С. П., Маневич А. Г., Крамарева Л. С.* Комплексный мониторинг эксплозивных извержений вулканов Камчатки / Отв. ред. О. А. Гирина. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2018. 192 с.
- Гирина О. А., Маневич А. Г., Мельников Д. В., Нурдаев А. А., Демянчук Ю. В.* Активность вулканов Камчатки в 2013 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы региональной конференции, посвящ. Дню вулканолога, 27–28 марта 2014 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 38–45.
- Гирина О. А., Горбач Н. В., Давыдова В. О., Мельников Д. В., Маневич Т. М., Маневич А. Г., Демянчук Ю. В.* Эксплозивное извержение вулкана Безымянный 15 марта 2019 г. и его продукты // Вулканология и сейсмология. 2020. № 6. С. 50–66. <https://doi.org/10.31857/S0203030620060139>
- Гирина О. А., Мельников Д. В., Маневич А. Г., Нурдаев А. А., Романова И. М., Лупян Е. А., Кашицкий А. В., Сорокин А. А., Крамарева Л. С.* Эксплозивное извержение вулкана Безымянный 21 октября 2020 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXIV ежегодной науч. конф., посвящ. Дню вулканолога, 29–30 марта 2021 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2021. С. 29–31.
- Горбач Н. В., Портнягин М. В., Философова Т. М.* Динамика роста экструзивного купола и вариации химического и минералогического составов андезитов вулкана Молодой Шивелуч в 2001–2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2016. № 6. С. 37–61. <https://doi.org/10.7868/S0203030616060031>
- Горбач Н. В., Плечова А. А., Маневич Т. М., Портнягин М. В., Философова Т. М., Самойленко С. Б.* Состав вулканических пеплов и динамика извержения вулкана Жупановский в 2013–2016 гг. // Вулканология и сейсмология. 2018. № 3. С. 3–20. <https://doi.org/10.7868/S020303061803001X>
- Горбач Н. В., Философова Т. М., Мельников Д. В., Маневич Т. М.* Состав вулканических стёкол в продуктах вершинного извержения и побочного прорыва им. Г. С. Горшкова на вулкане Ключевской в 2020–2021 гг.: сравнительный анализ и интерпретация // Вулканология и сейсмология. 2022. № 2. С. 28–37. <https://doi.org/10.31857/S0203030622010035>
- Гущенко И. И.* Извержения вулканов мира. Каталог / Отв. ред. К. Н. Рудич. М.: Наука, 1979. 476 с.
- Малик Н. А., Максимов А. П., Ананьев В. В.* Извержение вулкана Кизимен в 2010–2012 гг. и его продукты // Материалы региональной конф. “Вулканизм и связанные с ним процессы”, посвящ. Дню вулканолога, 29–30 марта 2012 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 64–70.
- Маневич А. Г., Гирина О. А., Мельников Д. В., Нурдаев А. А., Демянчук Ю. В., Котенко Т. А.* Активность вулканов Камчатки и Курил в 2018 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXII Всеросс. науч. конф., посвящ. Дню вулканолога, 28–29 марта 2019 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. С. 28–31.
- Мельников Д. В., Двигало В. Н., Мелекесцев И. В.* Извержение 2010–2011 гг. камчатского вулкана Кизимен: динамика эруптивной активности и геолого-геоморфологический эффект (на основе данных дистанционного зондирования) // Вест. КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2011. № 2. С. 87–101.
- Муравьев Я. Д., Овсянников А. А., Шираива Т.* Деятельность вулканов Северной группы по данным бурения в кратерном леднике (Вулкан Ушковский, Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2007. № 1. С. 47–57.
- Озеров А. Ю., Гирина О. А., Жаринов Н. А., Белоусов А. Б., Демянчук Ю. В.* Извержения вулканов Северной группы Камчатки в начале XXI века // Вулканология и сейсмология. 2020. № 1. С. 3–19. <https://doi.org/10.31857/S0203030620010058>
- Озеров А. Ю.* Ключевской вулкан: вещество, динамика, модель. М.: ГЕОС, 2019. 306 с.
- Пономарева В. В., Портнягин М. В., Мельников Д. В.* Состав тефры современных (2009–2011 гг.) извержений вулканов Камчатки и Курильских островов // Вест. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Вып. № 49. С. 5–9.
- Abbot P. M., Davies S. M.* Volcanism and the Greenland ice-cores: the tephra record // Earth-Science Reviews. 2012. V. 115. № 3. P. 1730191. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.09.001>
- Auer A., Belousov A., Belousova M.* Deposits, petrology and mechanism of the 2010–2013 eruption of Kizimen volcano in Kamchatka, Russia // Bulletin of Volcanology. 2018. V. 80. № 33. <https://doi.org/10.1007/s00445-018-1199-z>
- Cole-Dai J., Mosley-Thompson E., Wight S. P., Thompson L. G.* A 4100-year record of explosive volcanism from an East Antarctica ice core // Journ. of Geophys. Research. 2000. V. 105. P. 24431–24441. <https://doi.org/10.1029/2000JD900254>

- Cook E., Portnyagin M., Ponomareva V., Bazanova L., Anders S., Garbe-Schönberg D. First identification of cryptotephra from the Kamchatka Peninsula in a Greenland ice core: Implications of a widespread marker deposit that links Greenland to the Pacific northwest // *Quaternary Science Reviews*. 2018. V. 181. P. 200–206. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.11.036>
- Cook E., Abbott P. M., Pearce N. Mojtabavi S., Svensson A., Bourne A. J., Rasmussen S. O., Seierstad I. K., Vinther B. M., Harrison J., Street E., Steffensen J. P., Wilhelms F., Davies S. M. Volcanism and the Greenland ice cores: A new tephrochronological framework for the last glacial-interglacial transition (LGIT) based on cryptotephra deposits in three ice cores // *Quaternary Science Reviews*. 2022. V. 292. P. 107596. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107596>
- Davydova V. O., Shcherbakov V. D., Plechov P. Y., Koulakov I. Y. Petrological evidence of rapid evolution of the magma plumbing system of Bezymianny volcano in Kamchatka before the December 20th, 2017 eruption // *Journ. of Volcanology and Geothermal Research*. 2022. V. 421. P. 107422. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107422>
- Fiacco Jr., Thordarson R. J. T., Germani M. S., Self S., Palais J. M., Whitlow S., Grootes P. M. Atmospheric aerosol loading and transport due to the 1783–84 Laki eruption in Iceland, interpreted from ash particles and acidity in the GISP2 ice core // *Quaternary Research*. 1994. V. 42 (3). P. 231–240.
- Girina O. A. Chronology of Bezymianny Volcano activity, 1956–2010 // *Journ. of Volcanology and Geothermal Research*. 2013. V. 263. P. 22–41. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.05.002>
- Gorbach N. V., Filosofova T. M., Portnyagin M. V. Amphibole record of 1964 plinian and following dome-forming eruptions of Shiveluch volcano, Kamchatka // *Journ. of Volcanology and Geothermal Research*. 2020. V. 407. P. 107108. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107108>
- Jarosewich E., Nelen J. A., Norberg J. A. Reference Samples for Electron Microprobe Analysis // *Geostand. Newsletters*. 1980. V. 4. P. 43–47.
- Jochum K. P., Stoll B., Herwig K., Willbold M., Hofmann A. W., Amini M., Aarburg S., Abouchami W., Hellebrand E., Mocek B., Raczek I., Stracke A., Alard O., Bouman C., Becker S., Dücking M., Brätz H., Klemd R., de Bruin D., Canil D., Cornell D., de Hoog C.-J., Dalpé C., Danyushevsky L., Eisenhauer A., Gao Y., Snow J. E., Groschopf N., Günther D., Latkoczy Ch., Guillong M., Hauri E. H., Höfer H. E., Lahaye Y., Horz K., Jacob D. E., Kasemann S. A., Kent A. J. R., Ludwig T., Zack T., Mason P. R. D., Meixner A., Rosner M., Misawa K., Nash B. P., Pfänder J., Premo W. R., Sun W. D., Tiepolo M., Vannucci R., Venne-mann T., Wayne D., Woodhead J. D. MPI-DING reference glasses for in situ microanalysis. New reference values for element concentrations and isotope ratios // *Geochem Geophys Geosystem*. 2006. V. 7. № 2. P. Q02008. <https://doi.org/10.1029/2005GC001060>
- Jochum K. P., Willbold M., Raczek I., Stoll B., Herwig K. Chemical characterisation of the USGS reference glasses GSA-1G, GSC-1G, GSD-1G, GSE-1G, BCR-2G, BHVO-2G and BIR-1G using EPMA, ID-TIMS, ID-ICPMS and LA-ICPMS // *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2005. V. 29. № 3. P. 285–302. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2005.tb00901.x>
- Kuehn S. C., Froese D. G., Shane P. A. The INTAV inter-comparison of electron-beam microanalysis of glass by tephrochronology laboratories: results and recommendations // *Quaternary International*. 2011. V. 246. № 1–2. P. 19–47. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.08.022>
- Lane C. S., Brauer A., Blockley S. P. E., Dulskim P. Volcanic ash reveals time-transgressive climate change during the Younger Dryas // *Geology*. 2013. V. 41. № 12. P. 1251–1254. <https://doi.org/10.1130/G34867.1>
- Le Bas M. J., Le Maitre R. W., Streckeisen A., Zanettin B. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram // *Journ. of Petrology*. 1986. V. 27. P. 745–750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>
- Lin J., Svensson A., Hvidberg C. S., Lohmann J., Kristiansen S., Dahl-Jensen D., Steffensen J. P., Rasmussen S. O., Cook E., Kjær H. A., Vinther B. M. Magnitude, frequency and climate forcing of global volcanism during the last glacial period as seen in Greenland and Antarctic ice cores (60–9 ka) // *Climate of the Past*. 2022. V. 18. № 3. P. 485–506.
- Lowe D. J., Pearce N. J., Jorgensen M. A., Kuehn S. C., Tryon C. A., Hayward C. L. Correlating tephras and cryptotephras using glass compositional analyses and numerical and statistical methods: review and evaluation // *Quaternary Science Reviews*. 2017. V. 175. P. 1–44.
- Lowe J., Barton N., Blockley S., Ramsey Ch. B., Cullen V. L., Davies W., Gamble C., Grant K., Hardiman M., Housley R., Lane Ch. S., Lee Sh., Lewis M., MacLeod A., Menzies M., Müller W., Pollard M., Price C., Roberts A. P., Rohling E. J., Satow C., Smith V. C., Stringer C. B., Tomlinson E. L., White D., Albert P., Arienzo I., Barker G., Borić D., Carandente A., Civetta L., Ferrier C., Guadelli J.-L., Karkanias P., Koumouzelis M., Müller U. C., Orsi G., Pross J., Rosi M., Shalamanov-Korobar L., Sirakov N., Tzedakis P. C. Volcanic ash layers illuminate the resilience of Neanderthals and early modern humans to natural hazards // *Proc. of the National Academy of Sciences*. 2012. V. 109. № 34. P. 13532–13537.
- Melnikov D., Volynets A. O. Remote sensing and petrological observations on the 2012–2013 fissure eruption at Tolbachik volcano, Kamchatka: Implications for reconstruction of the eruption chronology // *Journ. of Volcanology and Geothermal Research*.

2015. V. 307. P. 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.09.025>
- Mikhaleiko V. N., Kutuzov S. S., Toropov P. A., Legrand M., Sokratov S. A., Chernyakov G. A., Lavrentiev I. I., Preunkert S., Kozachek A., Vorobiev M. A., Khairedinova A. G., Lipenkov V. Ya. Accumulation rates over the past 260 years archived in Elbrus ice core, Caucasus // *Climate of the Past. Discussions*. 2023. <https://doi.org/10.5194/cp-2023-46>
- Plunkett G., Sigl M., McConnell J.R., Pilcher J. R., Chellman N. J. The significance of volcanic ash in Greenland ice cores during the Common Era // *Quaternary science reviews*. 2023. V. 301. P. 107936. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107936>
- Ponomareva V., Portnyagin M., Pevzner M., Blaauw M., Kyle Ph., Derkachev A. Tephra from andesitic Shiveluch volcano, Kamchatka, NW Pacific: chronology of explosive eruptions and geochemical fingerprinting of volcanic glass // *Intern. Journ. of Earth Sciences*. 2015. V. 104. № 5. P. 1459–1482. <https://doi.org/10.1007/s00531-015-1156-4>
- Ponomareva V., Pendea I. F., Zelenin E., Portnyagin M., Gorbach N., Pevzner M., Plechova A., Derkachev A., Rogozin A., Garbe-Schönberg D. The first continuous late Pleistocene tephra record from Kamchatka Peninsula (NW Pacific) and its volcanological and paleogeographic implications // *Quaternary Science Reviews*. 2021. V. 257. P. 106838. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106838>
- Portnyagin M. V., Ponomareva V. V., Zelenin E. A., Bazanova L. I., Pevzner M. M., Plechova A. A., Rogozin A. N., Garbe-Schönberg D. TephraKam: geochemical database of glass compositions in tephra and welded tuffs from the Kamchatka volcanic arc (northwestern Pacific) // *Earth System Science Data*. 2020. V. 12. № 1. P. 469–486. <https://doi.org/10.5194/essd-12-469-2020>
- Shiraiwa T., Murav'yev Y.D., Kameda T., Nishio F., Toyama Y., Takahashi A., Ovsyannikov A. A., Salamatin 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*

Citation: Gorbach N. V., Filosofova T. M., Mikhaleiko 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): 066–080. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673424010053

Identification of tephra horizons in a glacier on the Ushkovsky volcano (Kamchatka)

N. V. Gorbach^{a, b#}, T. M. Filosofova^a, V. N. Mikhaleiko^b

^a*Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

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

[#]*e-mail: n_gorbach@mail.ru*

Received November 9, 2023; revised November 26, 2023; accepted March 31, 2024

Identification of tephra and its allocation (association) with known eruptive events allows obtaining chronostratigraphic markers, on the basis of which an age scale for dating glacial strata can be developed. To determine the sources of ash in the ice core obtained in 2022 during drilling of glacier in the crater of the Ushkovsky volcano in Kamchatka, the chemical composition of volcanic glass in individual ash particles was analyzed. The accuracy of determination of the volcanic glass composition was verified by analyzing of international standard samples of volcanic and synthetic glass. Based on a comparison of the data we obtained with published data on the composition of tephra glasses from the present-day eruptions in Kamchatka, we determined affiliation of each tephra horizon to specific volcano-source. We have found that the main source of tephra in the ice core of the Ushkovsky Glacier is the Kliuchevskoi volcano, which is the closest and the most productive one among the Kamchatka volcanoes. Ash particles from Bezmyannyi volcano were identified in two horizons. A mixed population of particles was found in one of the horizons, including the ash particles from volcanoes Kizimen, Kliuchevskoi and Bezmyannyi. Analysis of published data on the chronology and distribution of ash plumes from known eruptive events made it possible to confidently correlate the tephra horizon at a depth of 762–777 cm with the initial phase of the eruption of the Kizimen volcano in late 2010–early 2011. Ash from the

uppermost tephra buried in the glacier at depths of 89–94 cm belongs to the Bezymyanni volcano eruption, which the most likely occurred in October 2020. Single particles with rhyolitic composition of glass in the sample from the depth of 348–354 cm may belong to the eruption of the Shiveluch volcano in December 2018. The results of our work can be used on further studying of the ice core from the Ushkovsky volcano, in particular for comparison and correlation with the chronostratigraphic data obtained by glacio-chemical and isotope methods.

Keywords: tephra, volcanic glass, ice core, energy dispersive analysis; Ushkovsky volcano, Kamchatka

- Glaciology. 2001. V. 47. № 158. P. 423–432. <https://doi.org/10.3189/172756501781832061>
- Sinnl G., Winstrup M., Erhardt T., Cook E., Jensen C. M., Svensson A., Vinther B. M., Muscheler R., Rasmussen S. O. A multi-ice-core, annual-layer-counted Greenland ice-core chronology for the last 3800 years: GICC21 // *Climate of the Past*. 2022. V. 18. № 5. P. 1125–1150. <https://doi.org/10.5194/cp-18-1125-2022>
- ### REFERENCES
- Vlodavets V. I., Piip B. I. Catalogue of active volcanoes of Kamchatka. *Bulleten vulkanologicheskich stantsiy*. Bulletin of volcanological stations. Moscow: USSR Academy of Sciences. 1957, 25: 5–95 [In Russian].
- Girina O. A., Lupyay E. A., Sorokin A. A., Melnikov D. V., Romanova I. M., Kashnitsky A. V., Uvarov I. A., Malkovskiy S. I., Korolev S. P., Manevich A. G., Kramareva L. S. *Kompleksny monitoring explosivnykh izverzheniy vulkanov Kamchatki*. Integrated Monitoring of Explosive Eruptions of Kamchatka Volcanoes. Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 2018: 192 p. [In Russian].
- Girina O. A., Manevich A. G., Melnikov D. V., Nuzdaev A. A., Demyanchuk Y. V. Activity of Kamchatka volcanoes in 2013. *Vulkanizm i svyazannye c nim procesy*. Proc. of the regional conference Volcanism and related processes dedicated to the Day of Volcanologist, 27–28 March 2014. Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 2014: 38–45 [In Russian].
- Girina O. A., Gorbach N. V., Davydova V. O., Melnikov D. V., Manevich T. M., Manevich A. G., Demyanchuk Yu. V. The 15 March 2019 Bezymianny Volcano Explosive Eruption and Its Products. *Vulkanologiya i seismologiya*. Volcanology and seismology. 2020, 14: 394–409. <https://doi.org/10.1134/S0742046320060032> [In Russian].
- Girina O. A., Melnikov D. V., Manevich A. G., Nuzdaev A. A., Romanova I. M., Lupyay E. A., Kashnitsky A. V., Sorokin A. A., Kramareva L. S. Explosive eruption of Bezymyanni volcano on 21 October 2020. *Vulkanizm i svyazannye c nim procesy*. Volcanism and related processes. Proceedings of the XXIV Annual Scientific Conference dedicated to the Day of Volcanologist, 29–30 March 2021. Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 2021: 29–31 [In Russian].
- Gorbach N. V., Portnyagin M. V., Filosofova T. M. Dynamics of extrusive dome growth and variations in chemical and mineralogical composition of Young Shiveluch andesites in 2001–2013. *Vulkanologiya i seismologiya*. Volcanology and seismology. 2016, 6: 37–61. <https://doi.org/10.7868/S0203030616060031> [In Russian].
- Gorbach N. V., Plechova A. A., Manevich T. M., Portnyagin M. V., Filosofova T. M., Samoylenko S. B. The Composition of Volcanic Ash and the Dynamics of the 2013–2016 Zhupanovsky Volcano Eruption. *Vulkanologiya i seismologiya*. Volcanology and seismology. 2018, 3: 3–20. <https://doi.org/10.7868/S020303061803001X> [In Russian].
- Gorbach N. V., Filosofova T. M., Melnikov D. V., Manevich T. M. The Composition of Volcanic Glasses in the 2020–2021 Ejecta of the Summit Eruption and the Gorshkov Flank Vent at Klyuchevskoi Volcano: A Comparative Analysis and Interpretation. *Vulkanologiya i seismologiya*. Volcanology and seismology. 2022, 2: 28–37. <https://doi.org/10.31857/S0203030622010035> [In Russian].
- Gushchenko I. I. *Izverzheniya vulkanov mira. Katalog*. Volcanic eruptions of the world. Catalogue. Moscow: Nauka, 1979: 476 p. [In Russian].
- Malik N. A., Maksimov A. P., Ananiev V. V. Eruption of Kizimen volcano in 2010–2012 and its products. *Vulkanizm i svyazannye c nim procesy*. Volcanism and related processes. Proceedings of the Annual Scientific Conference, dedicated to the Day of Volcanologist, 29–30 March 2012. Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 2012: 64–70 [In Russian].
- Manevich A. G., Girina O. A., Melnikov D. V., Nuzdaev A. A., Demyanchuk Y. V., Kotenko T. A. Activity of volcanoes of Kamchatka and the Kurils in 2018. *Vulkanizm i svyazannye c nim procesy*. Volcanism and related processes. Proceedings of the XXII All-Russian Scientific Conference dedicated to the Day of Volcanologist, 28–29 March 2019. Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 2019: 28–31 [In Russian].

- Melnikov D. V., Dvigalo V. N., Melekestsev I. V.* Eruption 2010–2011 of the Kamchatka volcano Kizimen: dynamics of eruptive activity and geological and geomorphological effect (based on remote sensing data). *Vestnik Kamchatskoy regional'noy assotsiatsii "Uchebno-nauchnyy tsentr"*. *Seriya: Nauki o Zemle*. Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences. 2011, 2: 87–101 [In Russian].
- Murav'yev Y. D., Ovsyannikov A. A., Shiraiwa T.* Activity of volcanoes of the Northern Group according to drilling data in the crater glacier (Ushkovsky Volcano, Kamchatka). *Vulkanologiya i seismologiya*. Volcanology and Seismology. 2007, 1: 47–57 [In Russian].
- Ozerov A. Yu., Girina O. A., Zharinov N. A., Belousov A. B., Demyanchuk Y. V.* Volcanic eruptions of the Northern group of Kamchatka volcanoes in the early XXI century. *Vulkanologiya i seismologiya*. Volcanology and seismology. 2020, 1: 3–19. <https://doi.org/10.31857/S0203030620010058> [In Russian].
- Ozerov A. Yu.* *Kluchevskoy vulkan: veschestvo, dinamika, model*. Kliuchevskoi volcano: substance, dynamics, model. Moscow: GEOS, 2019: 306 p. [In Russian].
- Ponomareva V. V., Portnyagin M. V., Melnikov D. V.* Tephra composition of modern (2009–2011) volcanic eruptions of Kamchatka and Kuril Islands. *Vestnik Kamchatskoy regional'noy assotsiatsii "Uchebno-nauchnyy tsentr"*. *Seriya: Nauki o Zemle*. Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences. 2012, 2 (49): 5–9 [In Russian].
- Abbot P. M., Davies S. M.* Volcanism and the Greenland ice-cores: the tephra record. *Earth-Science Reviews*. 2012, 115 (3): 1730191. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.09.001>
- Auer A., Belousov A., Belousova M.* Deposits, petrology and mechanism of the 2010–2013 eruption of Kizimen volcano in Kamchatka, Russia. *Bulletin of Volcanology*. 2018, 80: 33. <https://doi.org/10.1007/s00445-018-1199-z>
- Cole-Dai J., Mosley-Thompson E., Wight S. P., Thompson L. G.* A 4100-year record of explosive volcanism from an East Antarctica ice core. *Journ. of Geophys. Research*. 2000, 105: 24431–24441. <https://doi.org/10.1029/2000JD900254>
- Cook E., Portnyagin M., Ponomareva V., Bazanova L., Anders S., Garbe-Schönberg D.* First identification of cryptotephra from the Kamchatka Peninsula in a Greenland ice core: Implications of a widespread marker deposit that links Greenland to the Pacific northwest. *Quaternary Science Reviews*. 2018, 181: 200–206. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.11.036>
- Cook E., Abbott P. M., Pearce N., Mojtavavi S., Svensson A., Bourne A. J., Rasmussen S. O., Seierstad I. K., Vinther Bo. M., Harrison J., Street E., Steffensen J. P., Wilhelm F., Davies S. M.* Volcanism and the Greenland ice cores: A new tephrochronological framework for the last glacial-interglacial transition (LGIT) based on cryptotephra deposits in three ice cores. *Quaternary Science Reviews*. 2022, 292: 107596. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107596>
- Davydova V. O., Shcherbakov V. D., Plechov P. Y., Koulikov I. Y.* Petrological evidence of rapid evolution of the magma plumbing system of Bezymianny volcano in Kamchatka before the December 20th, 2017 eruption. *Journ. of Volcanology and Geothermal Research*. 2022, 421: 107422. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107422>
- Fiacco Jr., Thordarson R. J. T., Germani M. S., Self S., Palais J. M., Whitlow S., Grootes P. M.* Atmospheric aerosol loading and transport due to the 1783–84 Laki eruption in Iceland, interpreted from ash particles and acidity in the GISP2 ice core. *Quaternary Research*. 1994, 42 (3): 231–240.
- Girina O. A.* Chronology of Bezymianny Volcano activity, 1956–2010. *Journ. of Volcanology and Geothermal Research*. 2013, 263: 22–41. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.05.002>
- Gorbach N. V., Filosofova T. M., Portnyagin M. V.* Amphibole record of 1964 plinian and following dome-forming eruptions of Shiveluch volcano, Kamchatka. *Journ. of Volcanology and Geothermal Research*. 2020, 407: 107108. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107108>
- Jarosewich E., Nelen J. A., Norberg J. A.* Reference Samples for Electron Microprobe Analysis. *Geostand. Newslett.* 1980, 4: 43–47.
- Jochum K. P., Stoll B., Herwig K., Willbold M., Hofmann A. W., Amini M., Aarburg S., Abouchami W., Hellebrand E., Mocek B., Raczek I., Stracke A., Alard O., Bouman C., Becker S., Dücking M., Brätz H., Klemd R., de Bruin D., Canil D., Cornell D., de Hoog C.-J., Dalpé C., Danyushevsky L., Eisenhauer A., Gao Y., Snow J. E., Groschopf N., Günther D., Latkoczy Ch., Guillong M., Hauri E. H., Höfer H. E., Lahaye Y., Horz K., Jacob D. E., Kasemann S. A., Kent A. J. R., Ludwig T., Zack T., Mason P. R. D., Meixner A., Rosner M., Misawa K., Nash B. P., Pfänder J., Premo W. R., Sun W. D., Tiepolo M., Vannucci R., Vennemann T., Wayne D., Woodhead J. D.* MPI-DING reference glasses for in situ microanalysis. New reference values for element concentrations and isotope ratios. *Geochem Geophys Geosyst*. 2006, 7 (2): Q02008. <https://doi.org/10.1029/2005GC001060>
- Jochum K. P., Willbold M., Raczek I., Stoll B., Herwig K.* Chemical characterisation of the USGS reference glasses GSA-1G, GSC-1G, GSD-1G, GSE-1G, BCR-2G, BHVO-2G and BIR-1G using EPMA, ID-TIMS, ID-ICPMS and LA-ICPMS. *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2005, 29 (3): 285–302. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2005.tb00901.x>
- Kuehn S. C., Froese D. G., Shane P. A.* The INTAV inter-comparison of electron-beam microanalysis of glass by tephrochronology laboratories: results and recommendations. *Quaternary International*. 2011, 246 (1–2): 19–47. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.08.022>

- Lane C. S., Brauer A., Blockley S. P.E., Dulskim P. Volcanic ash reveals time-transgressive climate change during the Younger Dryas. *Geology*. 2013, 41 (12): 1251–1254. <https://doi.org/10.1130/G34867.1>
- Le Bas M. J., Le Maitre R. W., Streckeisen A., Zanettin B. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journ. of Petrology*. 1986, 27: 745–750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>
- Lin J., Svensson A., Hvidberg C. S., Lohmann J., Kristiansen S., Dahl-Jensen D., Steffensen J. P., Rasmussen S. O., Cook E., Kjær H. A., Vinther B. M. Magnitude, frequency and climate forcing of global volcanism during the last glacial period as seen in Greenland and Antarctic ice cores (60–9 ka). *Climate of the Past*. 2022, 18 (3): 485–506.
- Lowe D. J., Pearce N. J., Jorgensen M. A., Kuehn S. C., Tryon C. A., Hayward C. L. Correlating tephra and cryptotephra using glass compositional analyses and numerical and statistical methods: review and evaluation. *Quaternary Science Reviews*. 2017, 175: 1–44.
- Lowe J., Barton N., Blockley S., Ramsey Ch.B., Cullen V. L., Davies W., Gamble C., Grant K., Hardiman M., Housley R., Lane Ch.S., Lee Sh., Lewis M., MacLeod A., Menzies M., Müller W., Pollard M., Price C., Roberts A. P., Rohling E. J., Satow C., Smith V. C., Stringer C. B., Tomlinson E. L., White D., Albert P., Arienzo I., Barker G., Borić D., Carandente A., Civetta L., Ferrier C., Guadelli J.—L., Karkanis P., Koumouzelis M., Müller U. C., Orsi G., Pross J., Rosi M., Shalamanov-Korobar L., Sirakov N., Tzedakis P. C. Volcanic ash layers illuminate the resilience of Neanderthals and early modern humans to natural hazards. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2012, 109 (34): 13532–13537.
- Melnikov D., Volynets A. O. Remote sensing and petrological observations on the 2012–2013 fissure eruption at Tolbachik volcano, Kamchatka: Implications for reconstruction of the eruption chronology. *Journ. of Volcanology and Geothermal Research*. 2015, 307: 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.09.025>
- Mikhailenko V. N., Kutuzov S. S., Toropov P. A., Legrand M., Sokratov S. A., Chernyakov G. A., Lavrentiev I. I., Preunkert S., Kozachek A., Vorobiev M. A., Khairedinova A. G., Lipenkov V. Ya. Accumulation rates over the past 260 years archived in Elbrus ice core, Caucasus. *Climate of the Past. Discussions*. 2023. <https://doi.org/10.5194/cp-2023-46>
- Plunkett G., Sigl M., McConnell J.R., Pilcher J. R., Chellman N. J. The significance of volcanic ash in Greenland ice cores during the Common Era. *Quaternary science reviews*. 2023, 301: 107936. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107936>
- Ponomareva V., Portnyagin M., Pevzner M., Blaauw M., Kyle Ph., Derkachev A. Tephra from andesitic Shiveluch volcano, Kamchatka, NW Pacific: chronology of explosive eruptions and geochemical fingerprinting of volcanic glass. *International Journ. of Earth Sciences*. 2015, 104 (5): 1459–1482. <https://doi.org/10.1007/s00531-015-1156-4>
- Ponomareva V., Pendea I. F., Zelenin E., Portnyagin M., Gorbach N., Pevzner M., Plechova A., Derkachev A., Rogozin A., Garbe-Schönberg D. The first continuous late Pleistocene tephra record from Kamchatka Peninsula (NW Pacific) and its volcanological and paleogeographic implications. *Quaternary Science Reviews*. 2021, 257: 106838. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106838>
- Portnyagin M. V., Ponomareva V. V., Zelenin E. A., Bazanova L. I., Pevzner M. M., Plechova A. A., Rogozin A. N., Garbe-Schönberg D. TephraKam: geochemical database of glass compositions in tephra and welded tuffs from the Kamchatka volcanic arc (northwestern Pacific). *Earth System Science Data*. 2020, 12 (1): 469–486. <https://doi.org/10.5194/essd-12-469-2020>
- Shiraiwa T., Murav'yev Y.D., Kameda T., Nishio F., Toyama Y., Takahashi A., Ovsyannikov A. A., Salamatin 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 Glaciology*. 2001, 47 (158): 423–432. <https://doi.org/10.3189/172756501781832061>
- Sinnl G., Winstrup M., Erhardt T., Cook E., Jensen C. M., Svensson A., Vinther B. M., Muscheler R., Rasmussen S. O. A multi-ice-core, annual-layer-counted Greenland ice-core chronology for the last 3800 years: GICC21. *Climate of the Past*. 2022, 18 (5): 1125–1150. <https://doi.org/10.5194/cp-18-1125-2022>