

Минеральный состав отложений вторичных фумарол на пирокластическом потоке извержения вулкана Молодой Шивелуч в апреле 2023 г.

А.В. Сергеева*, О.А. Гирина, Ш.С. Кудяева, В.И. Фролов, М.А. Назарова,
А.А. Кузьмина, Е.В. Карташева

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация
E-mail: anastavalers@gmail.com

Аннотация. Исследованы минеральные ассоциации на бортах бескорневых (вторичных) фумарол, появившихся на отложениях пирокластических потоков вулкана Шивелуч (Камчатка, Россия) после апрельского извержения 2023 г. Образования пирокластических потоков на юго-восточных склонах вулкана формировались поверх снежного покрова, частично перекрывая русло р. Кабеку и других ручьев. Движение раскаленных масс пирокластических потоков вызвало интенсивное снеготаяние. В местах скопления горячих глыб лавы, захороненных под толщей пирокластике, появились вторичные фумаролы с температурой выше 400 °С. Талые и метеорные воды обогащались растворимыми солями из свежей пирокластике, среди которых доминировали сульфат кальция, хлорид натрия, сульфаты и хлориды магния, алюминия, железа, аммония и др. Попадая в зону фумарол, холодные растворы вскипали, вызывая интенсивное перемешивание пирокластического материала, а также формирование на бортах фумарол отложений сульфатов, хлоридов, фторидов и целого спектра других элементов. Основными минералами бескорневых фумарол были ангидрит, галит, гематит, минералы групп алунита и ярозита, также встречались фторид магния, хлорид свинца и другие галогениды. Формирование этих минералов связано с процессами гидролиза солей алюминия и трехвалентного железа в условиях воздействия нагретого водяного пара, а также испарительного концентрирования на горячих участках пород. Для летучих соединений большую роль играет перенос в потоке газа с последующим отложением на кромках фумарольных выходов.

Ключевые слова: Шивелуч, бескорневые фумаролы, пирокластический поток, минералы фумарол, газотранспортные реакции

Финансирование. Работа выполнена по темам НИР ИВиС ДВО РАН. Динамика формирования пирокластических отложений описана в рамках НИР «Комплексный мониторинг активных вулканов Камчатки и Курильских островов наземными и дистанционными методами: изучение, оценка опасности, прогноз извержений вулканов...» (госрегистрация № 124031400008-3). Минералогические исследования выполнены по теме НИР «Роль гидротермальных систем Курило-Камчатской вулканической дуги в перераспределении мантийного и корового вещества, в процессах минерало-рудогенеза» (госрегистрация № 124032200002-0). Физико-химические исследования выполнены по теме НИР «Мониторинг влияния вулканической и гидротермальной активности на химический состав рек Камчатки» (госрегистрация № 124072500001-6). Использовались ресурсы Центра коллективного пользования ИВиС ДВО РАН «Камчатский центр элементного, минерального, изотопного анализа»

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Вклад авторов в публикацию. Сергеева А.В. — идея, написание разделов, подготовка иллюстраций, обработка данных, обсуждение результатов, работа с литературой; Гирина О.А. — идея, написание разделов, получение и обработка данных, обсуждение результатов, работа с литературой; Кудяева Ш.С. — получение и обработка минералогических данных, подготовка иллюстраций; Фролов В.И. — отбор материала, написание разделов, подготовка иллюстраций, обработка данных, обсуждение результатов; Назарова М.А. — получение данных, обработка данных, обсуждение результатов; Кузьмина А.А. — курирование методики аналитических исследований, обеспечение метрологических характеристик результатов, коррекция текста, обсуждение результатов; Карташева Е.В. — подбор

аналитических методов, курирование методик аналитических исследований, проверка сходимости и воспроизводимости результатов, обсуждение результатов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Д.В. Мельникову за обсуждение методов обработки данных.

Ссылка для цитирования: Сергеева А.В., Гирина О.А., Кудаева Ш.С., Фролов В.И., Назарова М.А., Кузьмина А.А., Карташева Е.В. Минеральный состав отложений вторичных фумарол на пирокластическом потоке извержения вулкана Молодой Шивелуч в апреле 2023 г. *Вулканология и сейсмология* / *Journal of Volcanology and Seismology*. 2026. №1. С. 28–50. <https://doi.org/10.7868/S3034513826010024>

DOI: 10.7868/S3034513826010024

Original Article

Mineral Composition of Secondary Fumarole Deposits in the Pyroclastic Flow of the Molodoy Sheveluch Volcano Eruption in April 2023

A.V. Sergeeva*, O.A. Girina, Sh.S. Kudaeva, V.I. Frolov, M.A. Nazarova,
A.A. Kuzmina, E.V. Kartasheva

*Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS,
Petrovsk-Kamchatsky, Russian Federation
E-mail: anastavalers@gmail.com

Abstract. The mineral associations on the sides of secondary fumaroles that formed after the April 2023 eruption of the Sheveluch volcano in Kamchatka, Russia, were studied. These fumaroles appeared on the pyroclastic deposits, which were formed on the southeastern slopes of the volcano after the eruption. The pyroclastic flows partially blocked the courses of the Kabeku River and other streams, causing intense snowmelt. In places where hot lava blocks were buried under pyroclastic layers, secondary fumaroles with temperatures over 400 degrees Celsius appeared. Meltwater and meteoric water were enriched with soluble salts, including calcium sulfate, sodium chloride, and sulfates and chlorides of magnesium, aluminum, iron, and ammonium. Once in the fumarole area, the cold solutions boiled, causing intense mixing of pyroclastic material and the formation of deposits of sulfates, chlorides, fluorides, and a variety of other elements around the fumaroles. The main minerals found in rootless fumaroles include anhydrite, halite, hematite, alunite, jarosite, magnesium fluoride, and lead chloride, among others. The formation of these minerals is linked to the processes of aluminum and iron salt hydrolysis under the influence of hot water vapor and evaporative concentration in hot rocks. For volatile compounds, gas transport plays an important role in their movement, followed by their deposition at the edges of fumarolic outlets.

Keywords: Sheveluch, root-free fumaroles, pyroclastic flow, fumarole minerals, gas transportation reactions

Funding. The work was carried out within the framework of the research works of the Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. The dynamics of the formation of pyroclastic deposits was described within the framework of the topic “Comprehensive monitoring of active volcanoes of Kamchatka and the Kuril Islands using ground-based and remote methods: study, hazard assessment, forecast of volcanic eruptions ... (state registration No. 124031400008-3). Mineralogical studies were carried out on the research topic “The role of hydrothermal systems of the Kuril-Kamchatka volcanic arc in the redistribution of mantle and crustal matter, in the processes of mineral ore genesis” (state registration No. 124032200002-0). Physicochemical studies were carried out on the research topic “Monitoring the influence of volcanic and hydrothermal activity on the chemical composition of Kamchatka rivers” (state registration No. 124072500001-6). Resources of the Collective Use Center 'Kamchatka Center for Elemental, Mineral, and Isotopic Analysis' at the Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, were used.

Conflict of interests. The authors of this work declare that they have no conflicts of interest.

Authors contribution. Sergeeva A.V. — idea, writing sections, preparing illustrations, data processing, discussing results, working with literature; Girina O.A. — idea, writing sections, obtaining and processing data, discussing results, working with literature; Kudaeva Sh.S. — obtaining and processing mineralogical data, preparing illustrations; Frolov V.I. — selection of material, writing sections, preparation of illustrations, data processing, discussion of results; Nazarova M.A. — data acquisition, data processing, discussion of results; Kuzmina A.A. — supervision of analytical research methodology, provision of

metrological characteristics of results, text correction, discussion of results; Kartasheva E.V. — selection of analytical methods, supervision of analytical research methods, verification of convergence and reproducibility of results, discussion of results.

Acknowledgements. The authors are grateful to D.V. Melnikov for discussion of data processing methods.

For Citation: Sergeeva A.V., Girina O.A., Kudaeva Sh.S., Frolov V.I., Nazarova M.A., Kuzmina A.A., Kartasheva E.V. Mineral Composition of Secondary Fumarole Deposits in the Pyroclastic Flow of the Molodoy Sheveluch Volcano Eruption in April 2023. *Vulkanologiya i Seismologiya / Journal of Volcanology and Seismology*. 2026;(1):28–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S3034513826010024>

ВВЕДЕНИЕ

Проблема фумарольного минералообразования на вулканах весьма интересна во многих аспектах, в том числе в плане механизмов переноса и концентрирования веществ, формирования источников массы и связи минерализации фумарол с геохимическими особенностями вулканических систем [36]. И хотя фумарольные процессы существуют только в активных зонах планеты Земля, похожие условия, связанные с развитым вулканизмом и в целом с высокой температурой, могут встретиться на Венере, Ио и других телах Солнечной системы. Как результат, разработки по минералогии, связанной с фумаролами, могут найти применение в исследовании минералогии внеземных тел [57, 48].

Фумарольные выходы, представляющие собой геохимические барьеры, способствуют накоплению значимых концентраций редких и рассеянных элементов вплоть до их выделения в виде самостоятельных фаз. Поступление элементов к месту концентрирования в фумаролах определяется сложной совокупностью процессов, в том числе условиями фильтрации, характеристиками теплоносителя, смешением с метеорными водами и кислородом воздуха, изменчивым составом флюидной среды, температурными профилями проницаемых зон. Накопление редких и рассеянных элементов на геохимических барьерах, характеризующихся резкой сменой условий, таких как фумарольные выходы, происходит в течение непрекращающейся активности флюидных потоков.

Ранее были выполнены многочисленные исследования формирования фумарольной минерализации, возгонов, в том числе с помощью экспериментов с использованием кварцевых трубок, установленных в фумаролах Авачинского вулкана [39]. Было показано, что кроме сульфата кальция и галита, в ассоциации формируется опал, мышьяк-серное стекло, масканьит, ральстонит — фторид натрия, алюминия и магния, соли на основе хлорида свинца, соли таллия [58]. Хорошо изучена фумарольная минерализация шлаковых конусов Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ), произошедшего в 1975–1976 гг., в выходах фумарол которых обнаружены многочисленные соединения мышьяка, меди, селена, таллия, отмечаются соединения висмута, цезия, молибдена, цинка, кадмия, есть сведения о самородном золоте [6, 34, 36, 8, 38]. Среди минералов фумарол Активной воронки Мутновского вулкана также обнаружены: соли

мышьяка, селена; галогенов: хлора, брома, йода; тяжелых металлов: свинца, таллия, висмута, кадмия и др. [24, 71]. Исследования эманаций остывающих лав вулканов Шивелуч и Ключевской показали широкий спектр элементов, выносимых в виде галогенидов и, на последних этапах, сернистых соединений [2, 3]. Например, базальтовая лава побочного кратера Белянкина извержения 1953 г., остывая, выделяла в окружающую среду разнообразные микроэлементы: Be, Sc, Fe, Ga, Bi, Mo, V, Cu, Ag, Co, Pb, Ni, Zr, Cr, Sr, Ba [2, 3]. При остывании лавы до 450–500 °С из конденсатов вулканического газа исчезли Be, Te, Ag, Zn, Bi, но даже при 100 °С в составе оставались Pb, Ga, Mo, V, Cr, Zn. Практически все эти элементы обнаружены в составе минералов фумарол различных активных вулканов Земли.

Отдельные немногочисленные исследования были посвящены бескорневым фумаролам на отложениях пирокластических потоков вулканов Шивелуч и Безымянный [1, 3, 5, 31, 32, 33]. Газ из фумарол на отложениях пирокластических потоков Шивелуча выделялся с преобладающим содержанием SO₂, небольших количеств H₂S, CO₂, CO, H₂, HCl. Фумарола «Кипящая» на потоке Шивелуча выделяла HCl больше, чем другие; ее возгоны, кроме сульфатов, Fe, Al, Mg, Na, содержали хлориды [1]. По данным С.И. Набоко [33], при остывании отложений потока Шивелуча выделялся преимущественно сернистый газ, на поверхности его песчаных площадок образовались налеты сульфатов щелочных металлов, кальция, алюминия и магния; тенардит, мирабилит, бледит, глауберит, гипс, ангидрит, алуминит, эпсомит и квасцы; остывание свежих глыб лавы привело к образованию на их поверхности тонкого налета тенардита.

Исследование элементного состава минеральных отложений фумарол вулкана Эбеко показало, что в верхней части, где формируются серные конструкции, в составе построек присутствуют элементы: Ga, Ge, Y, Zr, Sr, Rb, Nb, Ni, Cu, Zn, Ag, Cd, Pb, Cr, Se, As, Sb, Te, Br, I. Кроме того, идентифицированы самостоятельные соединения кадмия, индия, вольфрама, сурьмы, свинца, циркония, олова, а основными минералами фумарольных выходов являются сера, опал, алунит [68].

В настоящей работе рассмотрено формирование минеральных ассоциаций бескорневых (вторичных) фумарол на отложениях пирокластических потоков апрельского извержения 2023 г. вулкана Шивелуч. Температуры таких фумарол достигают 200–350 °С

на глубине 10–40 см, притом, что мощность отложений пирокластики в этой зоне может составлять 10–15 м, их толща долго не остывает, на что указывают, в частности, долговременные термальные аномалии, фиксируемые на спутниковых снимках [13, 14]. Высокая температура в пределах канала и устья вторичной fumarолы делает возможным газотранспортный механизм переноса элементов [8, 7, 23, 43, 25, 26], формирования минеральных фаз, в присутствии паров воды интенсифицируются гидролитические процессы, в ходе которых дополнительно появляются летучие кислоты.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ

Шивелуч — наиболее активный вулкан Камчатки, расположенный в северной части Центральной

Камчатской депрессии, в 50 км от пос. Ключи и в 450 км от г. Петропавловск-Камчатский. Это одно из крупнейших вулканических сооружений Камчатки: поперечник основания вулкана достигает 45–50 км, площадь — не менее 1300 км² [30]. Современная постройка включает три главных элемента: Старый Шивелуч (3283 м), древнюю кальдеру и Молодой Шивелуч (2800 м). В кратере Молодого Шивелуча с августа 1980 г. растет лавовый купол, активность которого представлена экструзивными, эффузивными и эксплозивными — вулканического типа — извержениями [59]. Наиболее мощные эксплозивные извержения вулкана, связанные с ростом лавового купола, наблюдались в 2001, 2004, 2005 и 2010 гг. [13, 16, 35, 44].

Пароксизмальное эксплозивное извержение вулкана Молодой Шивелуч (далее — Шивелуч) непрерывно продолжалось с 10 по 13 апреля 2023 г. [15]. В результате извержения на его южном и юго-восточном

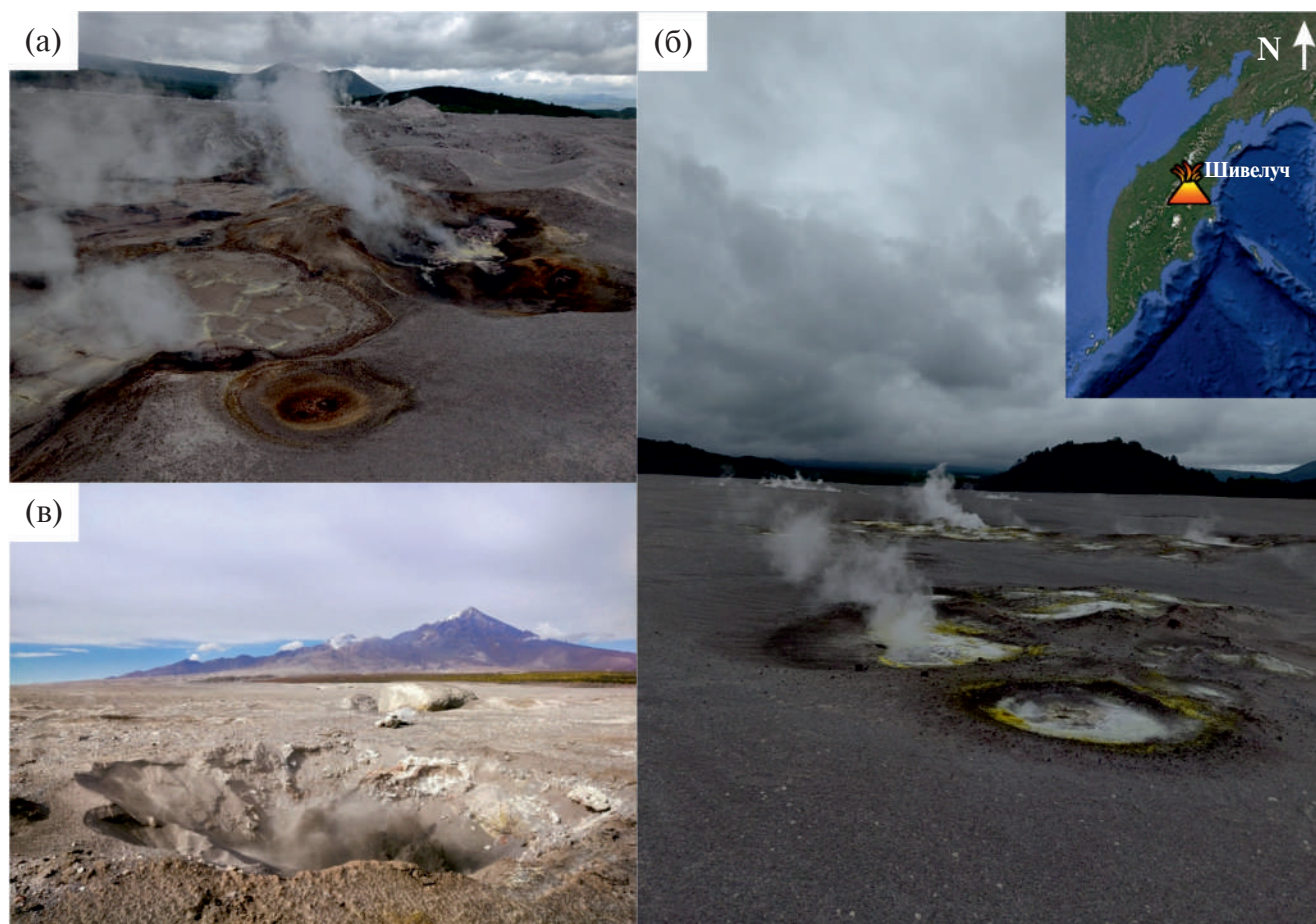


Рис. 1. Бескорневые fumarолы на отложениях пирокластического потока извержения 2023 г. вулкана Шивелуч: группа выходов парогазовой смеси на месте вторичных взрывов (а); линейно расположенные разгрузки с ореолом гидролизированных солей железа (III) характерного желто-оранжевого цвета (б); крупная воронка с фонтанированием пепла с температурой до нескольких сотен градусов (в); на врезке — местоположение вулкана Шивелуч на Камчатке. Фото: а — И.И. Тембрел, б — М.А. Никулина, в — В.И. Фролов

Fig. 1. Rootless fumaroles on the pyroclastic flow deposits of the 2023 eruption of Sheveluch volcano: a group of steam-gas mixture outlets at the site of secondary explosions (a); linearly located fumaroles with a halo of hydrolyzed iron (III) salts of a characteristic yellow-orange color (b); a large funnel with ash fountaining with a temperature up to several hundred degrees (v); inset — location of Sheveluch volcano in Kamchatka. Photo: a — I.I. Tembrel, б — M.A. Nikulina, в — V.I. Frolov

склонах образовались крупные отложения пирокластических потоков, площадь которых составила около 80 км^2 . В связи с тем, что в апреле все склоны вулкана, за исключением эксплозивного кратера, в котором продолжается рост лавового купола, были покрыты значительной толщей снега, во время движения раскаленного пирокластического потока по склонам вулкана в результате извержения снег быстро таял и превращался в пароводяную смесь. Это привело к появлению на поверхности отложений пирокластических потоков в ближней зоне от вулкана (до 10 км от активного центра) среднего размера (0,5–1 м) воронок вторичных взрывов (рис. 1). В дальней зоне от вулкана (более 10 км от активного центра), особенно по руслам ручьев и р. Кабеку, в которых толщи пирокластических отложений достигают мощности порядка 15 м, бескорневые фумаролы в основном приурочены к захороненным под толщей пирокластических отложений навалам крупных глыб лавы (см. рис. 1), перемещенных сюда пирокластическими потоками.

Основное количество бескорневых фумарол расположено на отложениях пирокластического потока шириной до первых километров в долине р. Кабеку примерно в 8–20 км от активного центра вулкана (см. рис. 1). Они явились результатом фреатических

взрывов, связанных со стремительным испарением воды под действием движущихся высокотемпературных пирокластических потоков. Источником воды изначально служил свежий снег на склонах вулкана, в дальнейшем — атмосферные осадки и погребенные под пирокластикой многолетние снежники. Бескорневые фумаролы на поверхности отложений пирокластических потоков представляют собой воронки диаметром от десятков сантиметров до 1,5–2 м, внутри которых наблюдается большое количество вторичных минералов разнообразного состава. В некоторых воронках отмечается активное фонтанирование песка рыжего цвета (рис. 2а).

На протяжении многолетней истории исследования вулканической деятельности вулкана Шивелуч учеными неоднократно фиксировались локальные проявления термальной активности на пирокластических потоках [14, 1, 3, 33]. Эти объекты формируются сравнительно быстро после образования пирокластического потока, имеют разный размер и представляют собой выходы нагретых флюидов с температурой от $200\text{--}350 \text{ }^\circ\text{C}$ и «кипящим слоем» из пирокластики; некоторые из них довольно быстро остывают и визуально отмечаются выступающими бело-желтыми

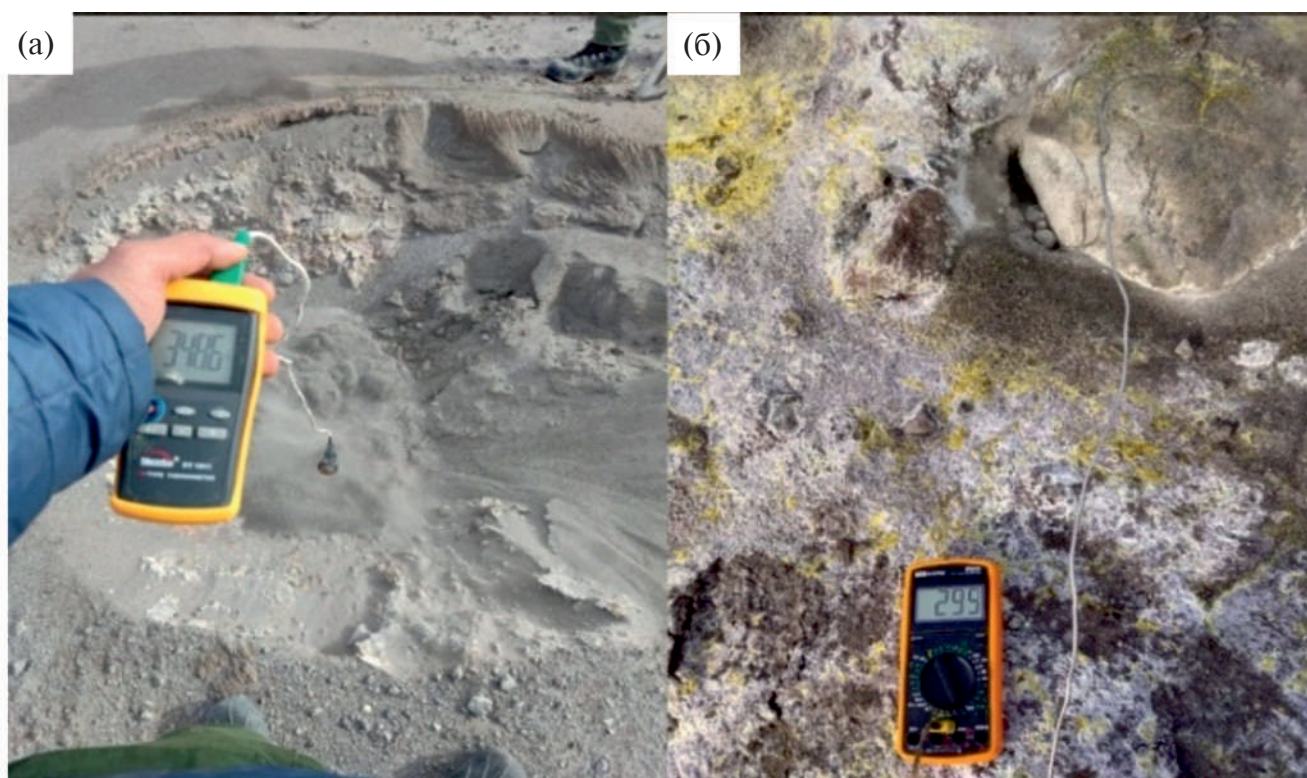


Рис. 2. Отложения пирокластических потоков извержения вулкана Шивелуч 10–13 апреля 2023 г.: температура $348,6 \text{ }^\circ\text{C}$ в воронке с фонтанирующим песком в середине сентября 2023 г. (а); температура $295 \text{ }^\circ\text{C}$ в воронке вторичного взрыва в начале ноября 2023 г. (б). Фото: а — И.А. Нуждаев, б — В.И. Фролов

Fig. 2. Deposits of pyroclastic flows from the Sheveluch volcano eruption of April 10–13, 2023: temperature of $348.6 \text{ }^\circ\text{C}$ in a funnel with fountaining sand in mid-September 2023 (a); temperature of $295 \text{ }^\circ\text{C}$ in the funnel of the secondary explosion in early November 2023 (b). Photo: a — I.A. Nuzhdaev, б — V.I. Frolov

солевыми выцветами, более характерными для прогретых грунтов термальных полей.

На линейное расположение фумарол и приуроченность их к погребенным руслам водотоков первым указал Г.С. Горшков [21]. Главные факторы, влияющие на распределение фумарол на поверхности отложений потоков, описал О.Г. Борисов [5]: мощность пироклаستيку и ее тепловой баланс; характер рельефа долины до и после отложения пироклаستيку; доступ дренажных вод к горячему материалу; проницаемость отложений потоков для дренажных вод; водопроницаемость и теплопроводность пород, подстилающих свежие пирокластические отложения; доступ воздуха к горячей пирокластике и др. Важная информация о строении пирокластических отложений Шивелуча дана в работе [19].

На отложениях пирокластических потоков 2023 г. фумаролы также расположены упорядоченно: формируют вытянутые вдоль потока скопления, большинство из которых приурочены к захороненным под слоем пироклаستيку прежним водотокам и гребням крупных глыб лавы, образовавшимся во время перемещения направленными взрывами материала разрушенного лавового купола.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе полевых работ в августе, сентябре и ноябре 2023 г. из бескорневых фумарол с их поверхности и с небольшой глубины (до 0,4 м) в центральной части пирокластического потока были отобраны образцы вторичных минералов. Во время отбора образцов были выполнены измерения температуры в приповерхностной части фумарол с помощью термопары, значения ее были до 350 и до 300 °С в сентябре и ноябре соответственно (см. рис. 2). Кроме этого, во время полевых работ в апреле–августе 2023 г. были отобраны образцы пепла исследуемого извержения вулкана Шивелуч и изучены его растворимые соли. В работе [42] на основании солевого состава пепловых образцов был дан прогноз состава минеральных ассоциаций, которые могли бы образоваться в ходе фумарольной активности.

Минеральные ассоциации, сформировавшиеся на бортах бескорневых фумарол, были исследованы методом рентгеновской дифрактометрии и инфракрасной спектроскопии. Колебательные спектры были записаны с помощью инфракрасного спектрофотометра с преобразованием Фурье, IRAffinity-1 (Shimadzu), в диапазоне волновых чисел 400–4000 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹, число сканов 100. Образцы для исследования были растерты в агатовый ступке с бромидом калия и спрессованы в таблетки. Порошкограммы записаны с помощью рентгеновского дифрактометра XRD MAX 7000 (Shimadzu) в диапазоне 6–65 °2θ с шагом 0,1 °2θ, скорость сканирования 2 град/мин при вращении образца.

Исследование микроморфологии и химического состава проводились на сканирующем электронном микроскопе, который оснащен энергодисперсионным спектрометром X–Max 80 mm² (Oxford Instruments). Этот спектрометр позволяет определять химические элементы, начиная с бериллия (Be). Частицы были выложены рядами на двусторонний углеродный скотч и покрыты тонким слоем углерода для обеспечения проводимости при наблюдениях в высоком вакууме. Точечный полуколичественный микроанализ частиц проводился при ускоряющем напряжении 20 kV и токе пучка 1 нА. Точная оценка минерального состава по данным микрозондовых исследований с неполированных образцов затруднена, поэтому мы лишь предполагаем ту или иную минеральную форму. Содержание воды также не представляется возможным оценить достоверно, поэтому приписывая тому или иному составу конкретную формулу, мы исходим из близости стехиометрических соотношений в измеренной точке и в конкретном минерале. Для простых минералов типа барита, ангидрита, галита задача сравнительно проста, но в случае минералов сложного состава можно лишь предполагать то или иное отнесение. При определении минерального состава дополнительно учитывали данные колебательной спектроскопии, в частности, при выявлении гидратированных солей. Аналитические исследования были выполнены на базе ЦКП (Центр коллективного пользования) «Камчатский центр элементного, минерального, изотопного анализа» ИВиС ДВО РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расположение групп бескорневых фумарол

Формирование отложений пирокластических потоков сопровождается переносом раскаленных глыб с температурой красного каления или выше. Захороненные под теплоизолирующим слоем пирокластического материала, глыбы становятся источником тепла, локально разогревая поток до нескольких сотен градусов. Метеорные воды, контактирующие с пирокластическими отложениями, насыщаются растворимыми солями последних, и далее солевой раствор достигает мест повышенной температуры, где и претерпевает испарение, в том числе — взрывное [9]. Соответственно, геометрия в расположении вторичных фумарол определяется руслами захороненных ручьев и рек.

Свежие отложения пирокластического материала показаны на рис. 3а. Взрывное испарение воды при контакте с раскаленными глыбами положило начало формированию бескорневых фумарол. Сопоставление спутниковых снимков (Sentinel-2 L2A) пирокластических отложений от 24 сентября 2022 г. в 23:59 UTC и 14 октября 2023 г. в 23:59 UTC (см. рис. 3б, в) до и после извержения вулкана Шивелуч 10–13 апреля 2023 г. показало приуроченность новообразованных фумарол к долине р. Кабеку и основным сезонным водотокам на юго-восточном склоне

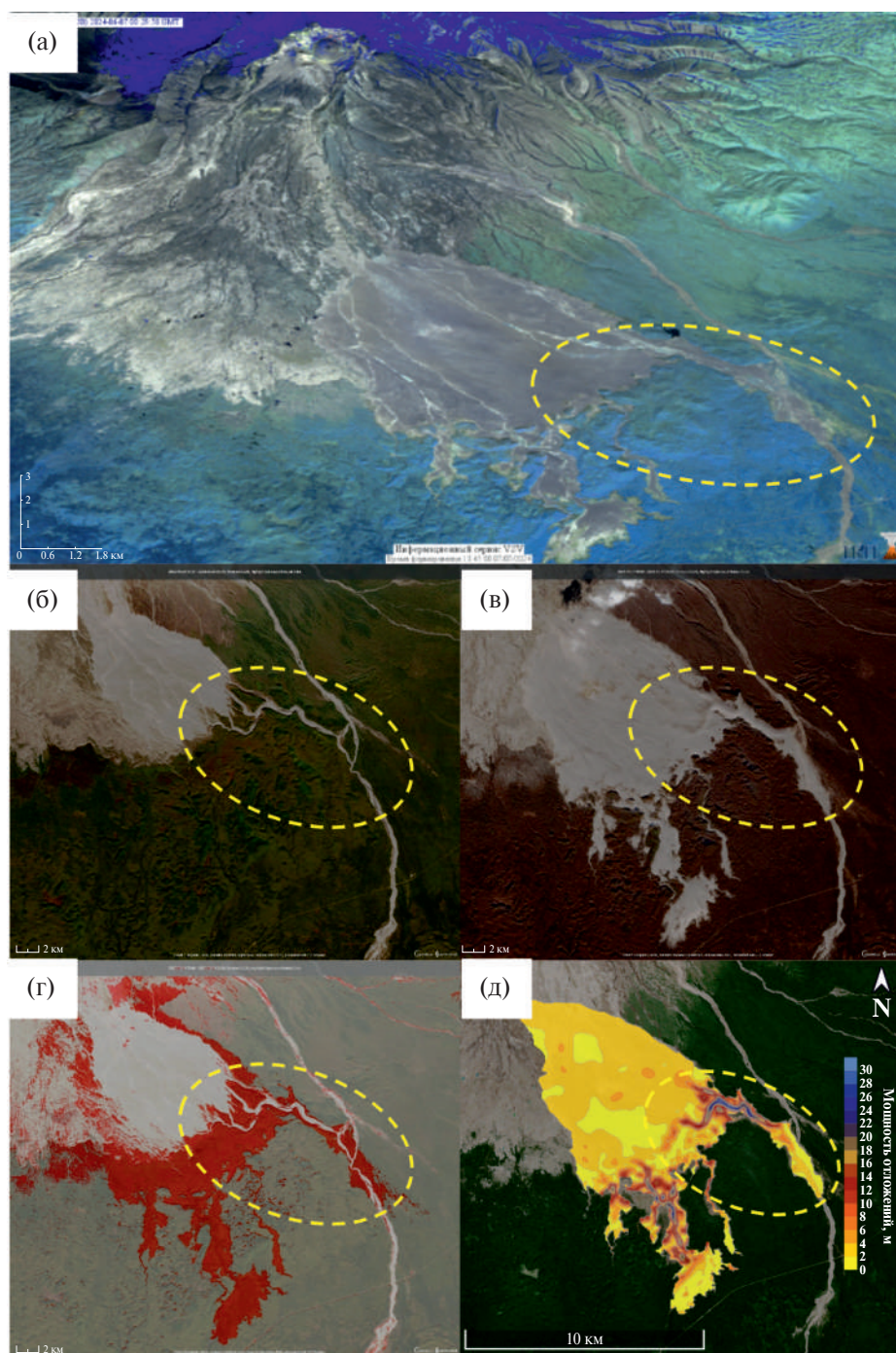


Рис. 3. Пирокластические отложения извержения 2023 г. на юго-восточном склоне вулкана Шивелуч на спутниковых снимках Sentinel: отложения 2023 г. в 00:29 UTC, 7 июня 2024 г. из ИС VolSatView (а); отложения 2010 г. 24 сентября 2022 г. (б); отложения 2023 г. 14 октября 2023 г. (в); разностное изображение рисунков (б) и (в), где красным цветом показана территория, перекрытая свежими пирокластическими отложениями 2023 г. (г); карта оценки распределения мощности отложений пирокластического потока 2023 г. (д) Пунктирным овалом отмечена область расположения большинства новообразованных бескорневых fumarол в пределах пирокластических отложений извержения 2023 г.

Fig. 3. Pyroclastic deposits from the 2023 eruption on the southeastern slope of Sheveluch volcano on Sentinel satellite images: 2023 deposits at 00:29 UTC, June 7, 2024, from the VolSatView information system (a); 2010 deposits on September 24, 2022 (б); 2023 deposits on October 14, 2023 (v); a difference image of figures (б) and (v), where the area overlain by fresh pyroclastic deposits of 2023 is shown in red (г); a map of the estimated distribution of the deposit thickness of the 2023 pyroclastic flow (д). The dotted oval marks the area where most of the newly formed rootless fumaroles are located within the pyroclastic deposits of the 2023 eruption

вулкана, в которых мощность пирокластических отложений оценочно достигает 15–30 м (см. рис. 3г, д). Общая площадь пирокластических отложений составляет 80 км², площадь отложений с мощностью более 1 м — 57 км² (см. рис. 3в). Разностная площадь в сравнении с 2010 г., характеризующая приращение области покрытия территории пирокластическим материалом в результате извержения 2023 г. (см. рис. 3г, выделена красным цветом), составляет 31 км².

В результате моделирования получена оценочная карта распределения мощности пирокластических отложений 2023 г. (см. рис. 3д). За основу взяты цифровые модели рельефа ArcticDEM спутниковой миссии DigitalGlobe WorldView-1, 2, 3 от 4 и 7 декабря 2022 г. Путем комбинирования двух моделей в программном комплексе Surfer (Golden Software, LLC) получена результирующая цифровая модель рельефа изучаемой области. В программе Google Earth Pro выполнена оцифровка контуров пирокластического потока 2023 г. на основании спутникового снимка Sentinel-2 L2A от 15 августа 2023 г. в 23:59 UTC. На основании имеющейся модели рельефа и контуров отложений пирокластического потока получен массив значений рельефа на границах потока, который использован для построения модельной поверхности пирокластических отложений. Для получения карты мощностей в программе Surfer выполнено вычитание цифровой модели рельефа до извержения 2023 г. из модельной поверхности пирокластических отложений 2023 г. в предположении, что пирокластический материал заполнял собой большую часть врезанных долин и впадин на склоне вулкана. При вычитании исключались значимые возвышенности в пределах площади отложений пирокластического потока, которые, очевидно, не перекрывались пирокластическим материалом. В результате получена карта распределения мощности пирокластических отложений извержения вулкана Шивелуч в апреле 2023 г. Полученная модель по понятным причинам не дает точных значений мощности пирокластике, однако позволяет оценить распределение отложений по площади и получить приблизительные значения мощности отложений. Согласно результатам расчетов, в программе Surfer объем пирокластических отложений на площади 57 км² составил 0,4 км³ при средней мощности отложений $6,0 \pm 0,9$ м (см. рис. 3д).

Макроминеральный состав отложений

Исследование водорастворимых солей пепла Шивелуча извержения 10–13 апреля 2023 г. показало, что основными солями являются сульфат кальция,

хлорид натрия, в меньших количествах присутствуют сульфаты и хлориды магния, алюминия, аммония, калия (табл. 1). Соответственно, в ходе фумарольной деятельности в составе ассоциаций должны доминировать сульфаты кальция различной степени гидратации — ангидрит, бассанит, гипс, минералы группы ярозита, алунита, кислые сульфаты типа летовицита или иных гидросульфатов, галит, гематит. Микроминеральный состав должен быть намного богаче, он определяется многофакторными условиями фильтрации геофлюидов сквозь толщу и взаимодействием «вода–порода», а также локальными условиями.

На рис. 4 показана стенка вторичной фумаролы, зачищенная в сентябре 2023 г. Перенесенные соли и новообразованные минералы отлагаются на бортах сформировавшихся бескорневых фумарол (см. рис. 1, 2, 4), а высокие температуры позволяют реализоваться редким процессам, например, возможен перенос в газовой фазе летучих хлоридов, таких как хлорид алюминия, железа(III), глубже протекают гидролитические процессы, в результате формируются минералы группы алунита и ярозита, и далее — вплоть до гематита и магнетита. В ходе гидролиза высвобождаются хлороводород и серная кислота, эти соединения агрессивны по отношению к минералам вмещающих пород и способствуют дальнейшему выщелачиванию ряда элементов, что приводит к усложнению состава минеральных ассоциаций. Верхняя часть и стенки вторичной фумаролы покрыты гематитовыми отложениями, минералами группы алунита и ярозита, ангидритом и галитом, причем вторичные минералы фумаролы цементируют исходные рыхлые отложения пирокластике. Обращает на себя внимание слоистость в распределении минеральных отложений на зачищенной стенке вторичной фумаролы. Вероятно, это отражение исходной вертикальной неоднородности пирокластического материала, связанной с неравномерным осаждением частиц из поднятой фреатическим взрывом пирокластике [11, 12, 10], в результате визуально проявляется вертикальная неоднородность или слоистость при формировании вторичной минерализации.

На рис. 5 показаны дифрактограммы агрегатов, слагающих борта бескорневых фумарол. Структурные данные для построения теоретических дифрактограмм взяты из баз данных <https://mincryst.iem.ac.ru/rus/>, <https://truff.info/ima/>, принципы анализа приведены в работе [62]. Выходы бескорневых фумарол обрамлены отложениями, состоящими из породообразующих минералов, сцементированных новообразованными соединениями; из породообразующих — доминируют

Таблица 1. Солевой состав растворимой части пеплов вулкана Шивелуч, изверженных в апреле 2023 г. [42]
Table 1. Salt composition of the soluble part of the ashes of the Sheveluch volcano erupted in April 2023 [42]

Солевой состав растворимой части пеплов, г/кг							
CaSO ₄	NaCl	MgCl ₂	MgSO ₄	KCl	AlCl ₃	NH ₄ Cl	FeCl ₃
5,43	0,54	0,54	0,40	0,11	0,08	0,02	0,01

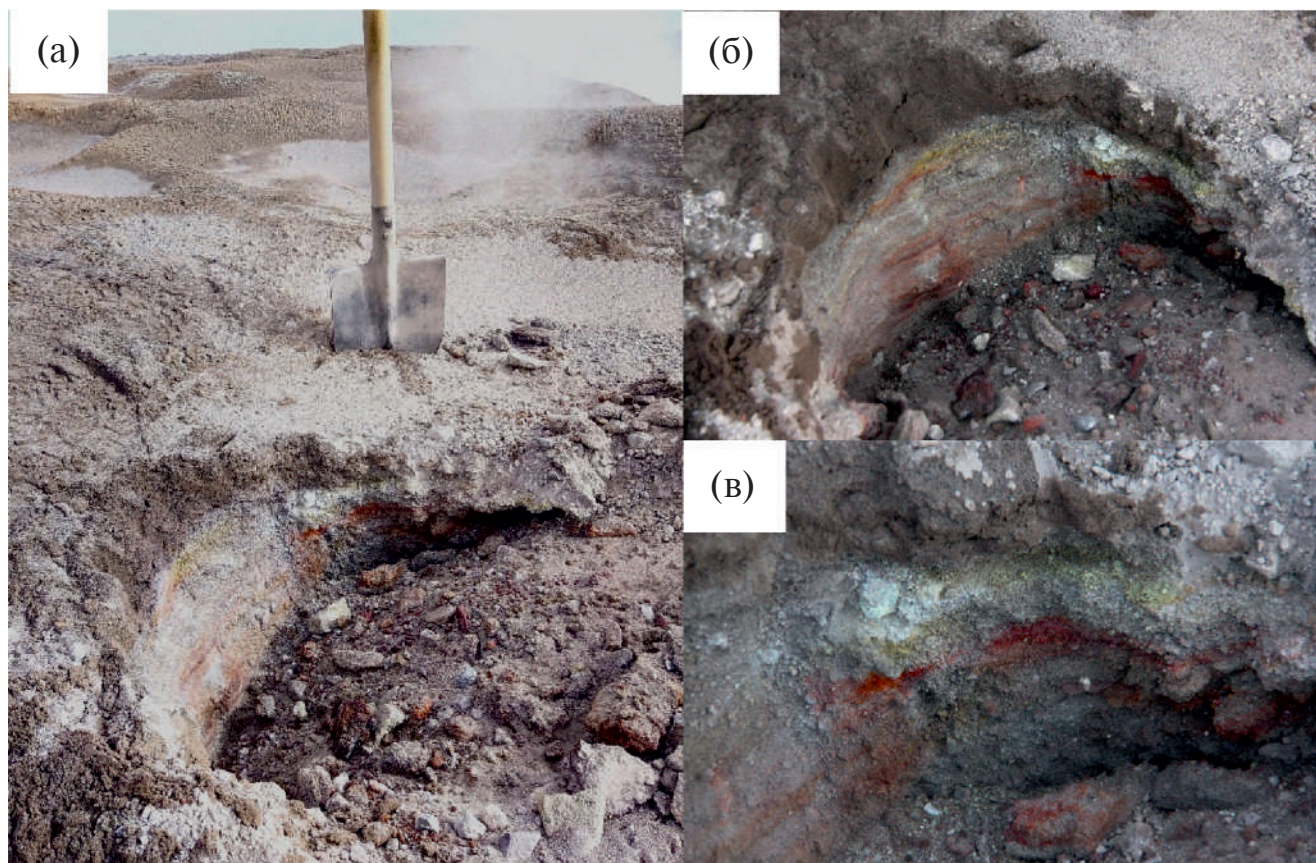


Рис. 4. Сцементированные хемогенным материалом пирокластические отложения апрельского извержения вулкана Шивелуч внутри бескорневых фумарол (воронки вторичных взрывов) по состоянию на сентябрь 2023 г.: белые солевые выцветы преимущественно ангидрит-алунит-галитового состава на новообразованном гематите (а); цемент пирокластики, представленный новообразованными минералами: ангидритом, галитом, алунит-язрозитовыми соединениями (б, в). Сверху воронки покрыты пирокластическими отложениями с гематитовой «шубой». Фото: В.И. Фролов

Fig. 4. Pyroclastic deposits from the April eruption of Sheveluch volcano cemented by chemogenic material within rootless fumaroles (secondary explosion funnels) as of September 2023: white salt efflorescences of predominantly anhydrite-alunite-halite composition on newly formed hematite (a); cement for pyroclastic, represented by newly formed minerals: anhydrite, halite, alunite-jarosite compounds (б, в). The upper parts of the funnels are covered with pyroclastic deposits with a hematite “fur coat”. Photo: V.I. Frolov

полевые шпаты и амфиболы, близкие к роговой обманке [18, 19, 20]. Возможен кристобалит, нередкий в отложениях фумарол [49, 50, 66, 67, 65], но точная идентификация затруднена ввиду наложения рефлексов кристобалита и плагиоклаза. Из минералов, непосредственно сформировавшихся в ходе парогазовой деятельности, доминирует ангидрит, гипс, галит, минералы группы алунита и ярозита, гематит. Фиксируются отдельные слабые рефлексы кислых сульфатов типа летовицита/ивсита $M^I_3H(SO_4)_2$, $M^I - Na^+$, NH_4^+ , вероятно K^+ , H_3O^+ , на которые накладываются рефлексы полевых шпатов, что затрудняет идентификацию. Также присутствует сабиит $(NH_4)Fe(SO_4)_2$, обнаруживаются слабые рефлексы ромбической серы, безводного сульфата магния.

Микрозондовые исследования

Микрозондовый анализ показал доминирование сульфатов кальция и хлорида натрия — галита, гематита, минералов группы алунита-язрозита (рис. 6).

Наличие гипса может быть связано с локальными охлаждениями различных участков «воронки с пепловыми фонтанами», при которых становится стабильным дигидрат сульфата кальция — гипс. Доминирование галита и ангидрита в составе отложений бескорневых фумарол показывает единый состав растворимых солей как для пепла, так и для пирокластического потока. Помимо ангидрита и галита, зафиксирован фторид магния, сульфат магния, хлорид свинца, барит, сульфаты и хлориды железа, аммония, многочисленные фазы, являющиеся продуктом гидролиза солей железа(III), включая его конечный продукт — гематит.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Во время извержения вулкана Шивелуч в апреле 2023 г. вместе с пеплом на дневную поверхность поступили растворимые соли, среди которых доминировал сульфат кальция и хлорид натрия, а кроме них — хлориды, сульфаты, фториды магния,

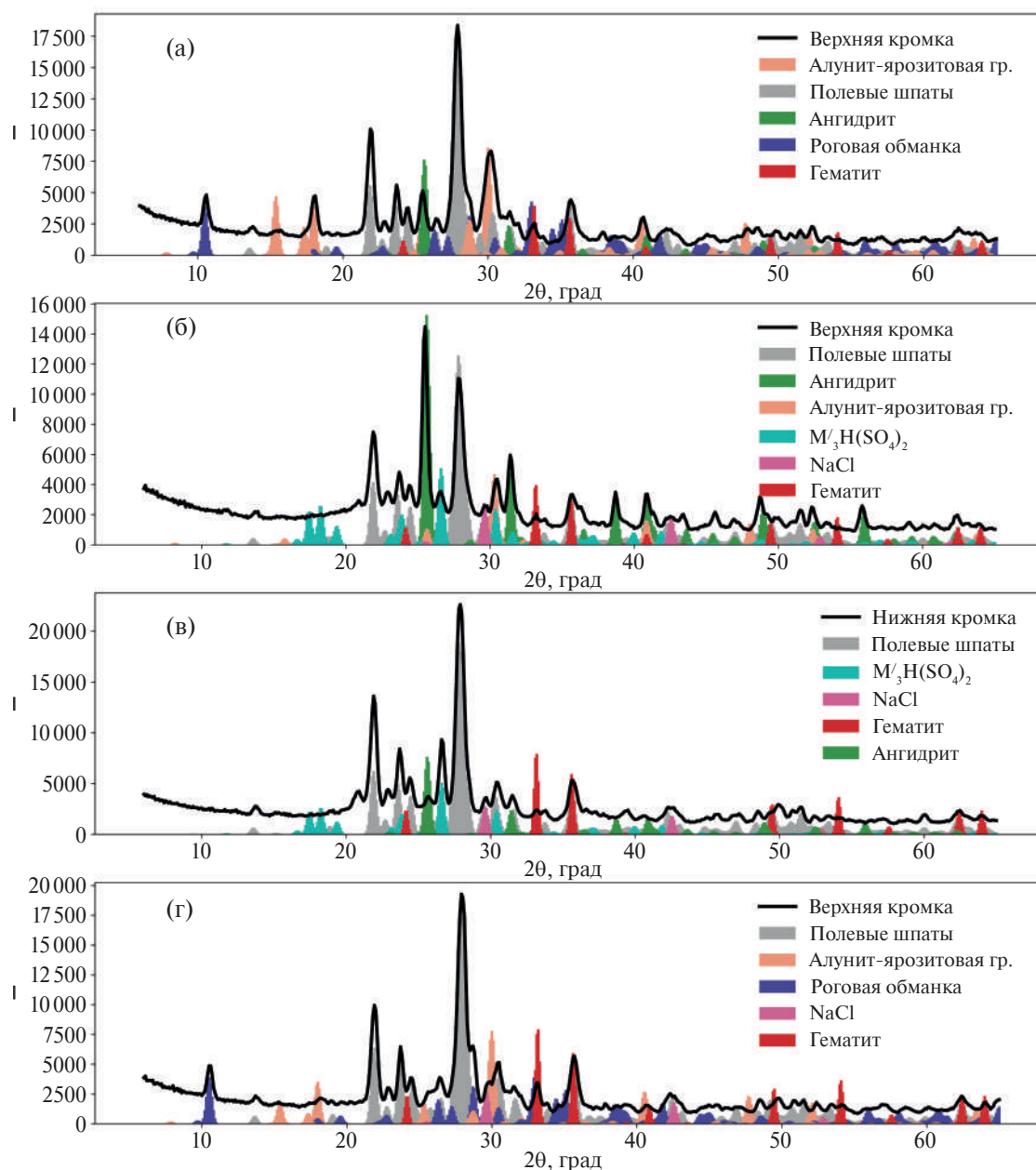


Рис. 5. Дифрактограммы образцов отложений вторичных фумарол с различных участков кромки, $M^I - NH_4^+, Na^+, K^+$. а — породы пирокластического потока, сцементированные вторичными минералами; верхняя кромка вторичной фумаролы; б — агрегат, сложенный сульфатами, кислыми сульфатами, гематитом и галитом; верхняя часть кромки вторичной фумаролы; в — кислые сульфаты в нижней части кромки воронки; г — породы, сцементированные алуни-ярзитовыми минералами, галитом и гематитом, без ангидрита; верхняя кромка вторичной фумаролы.

Fig. 5. Diffraction patterns of deposits samples of secondary fumarole from different sections of their rims, $M^I - NH_4^+, Na^+, K^+$.

а — pyroclastic flow rocks cemented by secondary minerals; upper rim of a secondary fumarole; б — aggregate composed of sulfates, acid sulfates, hematite, and halite; upper part of the rim of a secondary fumarole; в — acid sulfates in the lower part of the funnel rim; г — rocks cemented by alunite-jarosite minerals, halite, and hematite, without anhydrite; upper rim of a secondary fumarole

аммония, железа, свинца и ряда других элементов. О том, что вулканические пеплы поставляют ряд растворимых соединений различных элементов, известно давно [1, 2, 3, 31, 32]. Авторы работ, посвященных выносу растворимых веществ вместе с пеплом,

отмечают пагубное влияние на качество питьевых вод [72, 73], указывают на понижение рН и на повышение содержания сульфатов, хлоридов, фторидов кальция, магния, натрия, алюминия, железа [30, 69]. В водоемы поступают рудные элементы и тяжелые металлы

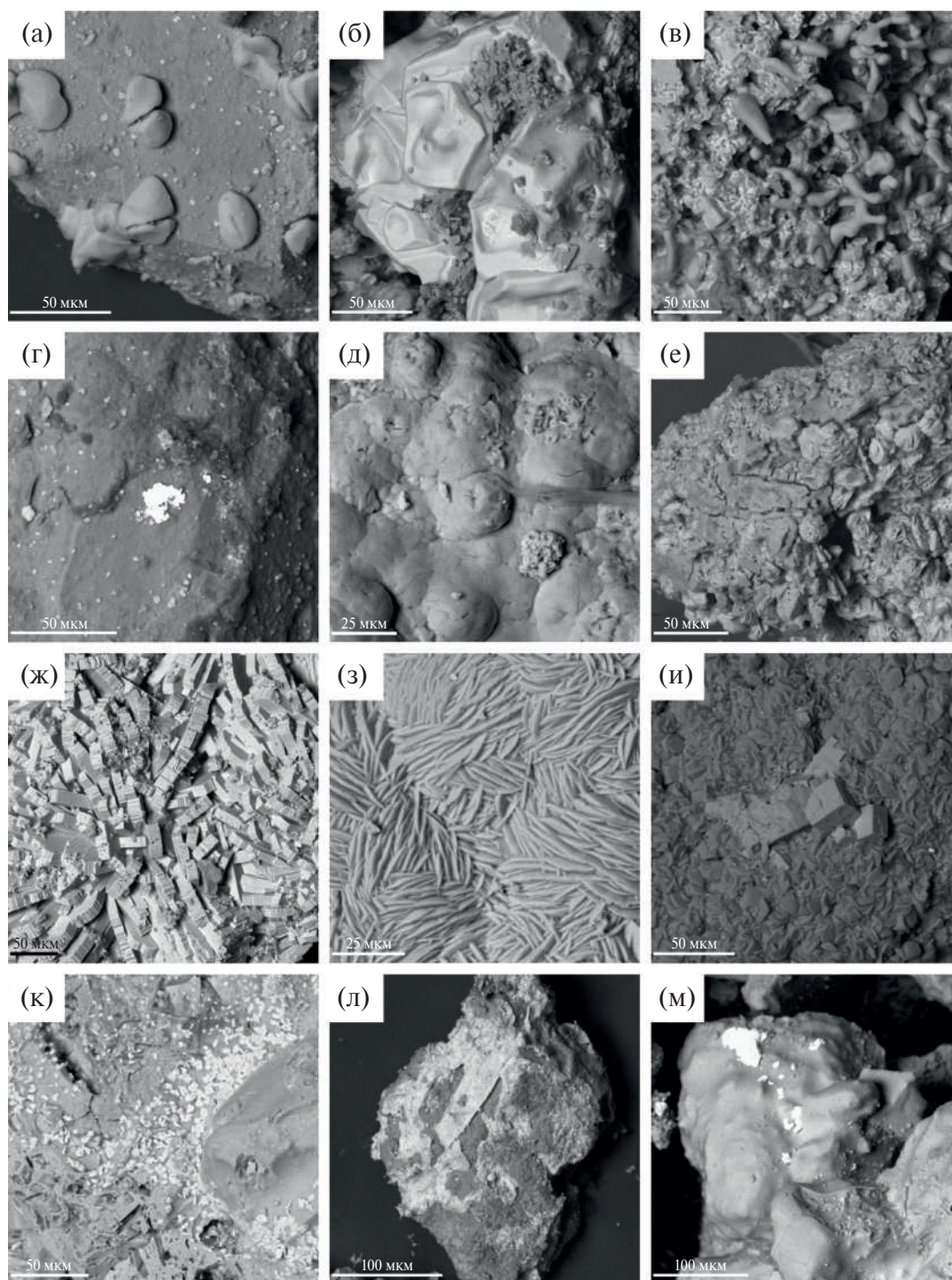


Рис. 6. Микрофотографии минеральных образований из бескорневых фумарол в обратно-рассеянных электронах: зерна галита (Hl) на фазе сложного состава (а); галит (Hl) и селлаит (Sel) (б); галит (в); хлорид свинца ($PbCl_2$) (г); фаза, близкая по составу к ралстониту (д); сульфаты Fe и Mg (е); агрегат ангидрита, сложенный таблитчатыми кристаллами (ж); срастание линзовидных кристаллов гипса? (з); гипс/ангидрит и ярозит (Jrs) (и); продукты гидролиза сульфатов железа и алюминия (к); оксиды железа (Fe-O) и ярозит (Jrs) (л); агрегаты барита (Brt) в ассоциации с фазой кремнезема (м)

Fig. 6. Backscattered electron micrographs of mineral formations from rootless fumaroles: halite (Hl) grains in a phase of complex composition (a); halite (Hl) and sellaite (Sel) (б); halite (в); lead chloride ($PbCl_2$) (г); a phase close in composition to ralstonite (д); Fe and Mg sulfates (е); anhydrite aggregate composed of tabular crystals (ж); intergrowth of lenticular gypsum crystals? (з); gypsum/anhydrite and jarosite (Jrs) (и); hydrolysis products of iron and aluminum sulfates (к); iron oxides (Fe-O) and jarosite (Jrs) (л); barite (Brt) aggregates in association with the silica phase (м)

вместе с пеплом вулканов Этна (Италия) [45], Тонгариро (Новая Зеландия) [52], Ньямурагира (Конго) [53], Гекла (Исландия). Однако отмечается тенденция к самоочищению вод, загрязненных растворимыми солями пеплов, в результате соосаждения примесных микроэлементов на гидроокислах железа и алюминия. Растворимые вещества пеплов вместе с метеорными водами поступали в речные сети, т.е. подвергались, преимущественно, процессам диссипации [54].

В то же время показано, что жерла фумарол благоприятны для концентрирования выносимых веществ. В связи с резко меняющимися условиями на границе с дневной поверхностью, резко изменяются летучесть и устойчивость ряда соединений, что приводит к перенасыщению горячего потока относительно выделения ряда фаз. Например, туфы Долины тысячи дымов (Катмаи, Аляска), в результате фумарольной деятельности, обогатились целым спектром элементов: Cl, F, Zn, Pb, Cu, Sn, Cr, Ni, As, Sb, Au, Br [61]. Коррозия частиц пепла под действием летучих кислот во время извержения переводит ряд элементов пород в подвижную растворимую форму, образуются соли кальция, магния, железа, алюминия и других элементов, растворимый комплекс пеплов обогащается фторидами [70]. Аналогично, коррозия вмещающих пород и породообразующих минералов под действием горячих фумарольных газов приводит к переходу элементов пород в растворимую подвижную форму. Агрессивные газы фумарол, такие как хлороводород, фтороводород, а также аэрозоль серной кислоты, в случае вторичных фумарол, образуются в результате гидролитических процессов с участием хлоридов и сульфатов железа, алюминия, других металлов. Продукты гидролиза составляют заметную часть фумарольной макроминерализации. Составы с предположительной идентификацией представлены в табл. 2.

Хлориды. Из хлоридов доминирует хлорид натрия, галит NaCl. Кроме галита, в ассоциации присутствуют хлориды магния, свинца, железа, хлорид аммония — нашатырь NH₄Cl. При нагревании хлориды в целом довольно летучи [37], за исключением хлоридов щелочных металлов, а в условиях повышенных температур и воздействия водяного пара подвергаются гидролизу. Примером гидролитического процесса с участием летучих хлоридов является гидролиз хлорида железа (III) по схеме $2\text{FeCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{HCl}$, причем FeCl₃ возгоняется уже при температуре порядка 200–250 °С, в паровой фазе димеризуется с образованием Fe₂Cl₆ [4]. Высвобождающийся хлороводород в дальнейшем воздействует на минералы вмещающих пород, попутно приводя к выносу элементов. Обнаружены и хлориды железа (II, III), видимо, не гидролизованные. Хлорид свинца PbCl₂, встречающийся в минеральной ассоциации, представляет собой малорастворимое соединение, есть и вероятный продукт его гидролиза с составом, близком к мепидиту Pb₃O₂Cl₂. Хлорид аммония при повышенных температурах разлагается на составные, поэтому его присутствие свидетельствует о локальных понижениях температуры на кромках вторичных

фумарол. Есть составы, близкие к хлориду магния, по всей видимости, безводному. При температуре выше 600 °С возможен гидролиз хлорида натрия, что дало бы нетривиальные силикатные минералы, однако доказательств таких процессов в пределах вторичных фумарол Шивелуча пока не имеется.

Фториды. Обнаружен фторид магния, минерал селлаит MgF₂, малорастворимое соединение, встречающееся как в фумаролах Толбачика, так и в эвапоритах [63, 41]. Его формирование является следствием концентрирования веществ на геохимическом барьере, которым является кромка бескорневых фумарол и в целом — выходы нагретых газов. А так как магния и фтора в водорастворимом комплексе пеплов заметное количество, то и выделение селлаита выглядит закономерным. Обнаружена фаза, близкая по составу к ральстониту NaMgAlF₆·H₂O, который до этого был найден в криолитовом месторождении в Ивигтуте, Южная Гренландия [60]. Фтор входит в состав соединения, близкого по стехиометрии к джурбаниту Al(OH)SO₄·5H₂O или его дегидратированным производным, видимо, образуется твердый раствор в подсистеме AlFSO₄—Al(OH)SO₄. Есть составы, близкие к хлориду-фториду магния-железа. Не обнаружен фторид кальция, флюорит, несмотря на присутствие фторид-ионов и кальция в минералообразующей среде. Одна из возможных причин — малая растворимость безводного сульфата кальция при температуре выше 200–300 °С.

Фторидные минералы вторичных фумарол пирокластического потока Шивелуча сходны с минералами современных вулканов. Например, в фумаролах исландских вулканов Эльдфедль и Гекла был найден минерал яacobссонит CaAlF₅ и сбаччиит Ca₂AlF₇ [51]. С яacobссонитом в ассоциациях находился леонардсенит MgAlF₅·2H₂O, ральстонит NaMgAlF₆·H₂O, геклаит KNaSiF₆, ангидрит, гипс, ярозит, гематит, опал и неустановленные фториды [46, 55]. Кроме них отмечается фторид натрия, кальция и алюминия Na₂Ca₃Al₂F₁₄, названный верхнейитом, он обнаружен на фумаролах вулканов Исландии и Италии [47]. Аммонийный чермессаит (NH₄)₂AlF₃(SO₄) обнаружен на фумароле Ла Фосса, Вулькано [56].

Подводя итог, отметим, что фторидная минерализация бескорневых фумарол сходна с минерализацией современных фумарол на вулканах, а также — с эвапоритовыми минеральными ассоциациями. Присутствие во вторичных фумаролах минералов гидролитического происхождения, таких как гематит, минералы группы алунита и ярозита и др., свидетельствует о сходстве процессов формирования состава минеральных ассоциаций в рассматриваемых условиях. В нашем случае, у вторичных фумарол хорошо известен источник солей — это промываемая метеорными водами толща пирокластических отложений. Сопоставление минеральных ассоциаций позволяет проводить уточняющие параллели с минералообразующими процессами на фумаролах активных кратеров.

Таблица 2. Минералы, близкие по стехиометрии к обнаруженным на стенках вторичных fumaroles at the pyroclastic flow**Table 2.** Minerals similar in stoichiometry to those found on the walls of secondary fumaroles at the pyroclastic flow

Минерал с близкой стехиометрией, формула	Название
Простые сульфаты	
CaSO ₄	Ангидрит
CaSO ₄ ·xH ₂ O	Гипс, бассанит
BaSO ₄	Барит
MgSO ₄ ·nH ₂ O	Старкеит, сандерит, кизерит
FeSO ₄ ·nH ₂ O	Ссомольнокит, роценит
Двойные сульфаты	
Fe ²⁺ Al ₂ (SO ₄) ₄ ·22H ₂ O	Галотрихит
MgAl ₂ (SO ₄) ₄ ·22H ₂ O	Пиккерингит
(NH ₄) ₂ Mg(SO ₄) ₂ ·6H ₂ O	Буссенготит
Хлориды	
NaCl	Галит
NH ₄ Cl	Нашатырь
FeCl ₂	Лавренсит
FeCl ₃	Молизит
MgCl ₂	Хлоромagneзит
PbCl ₂	Котуннит
Продукты гидролиза, от сульфатов до оксидов	
Al(SO ₄)(OH)·nH ₂ O	Риотинтоит, джурбанит, ростит
Fe ³⁺ _{0,67} Fe ³⁺ ₄ (SO ₄) ₆ (OH) ₂ ·20H ₂ O	Феррикопиапит
(Al, Mg)Fe ³⁺ ₄ (SO ₄) ₆ (OH, O) ₂ ·20H ₂ O	Алюмокопиапит
(Na, K)Al ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	Алунитовые минералы
(Na, K)Fe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	Ярозитовые минералы
Fe ₂ O ₃	Гематит
(H ₅ O ₂)Fe ³⁺ (SO ₄) ₂ ·2H ₂ O	Ромбоклаз
Фториды	
Al(SO ₄)F·5H ₂ O	Хадемит
MgF ₂	Селлаит
(Fe, Mg)(Cl, F) ₂	Нет данных
xNaF·yMgF ₂ ·zAlF ₃ ·pH ₂ O	Леонардсенит, нейборит, веберит, криолит, хиолит, жарчихит и др.

Примечание. x, y, z, p — стехиометрические коэффициенты в формулах двойных или тройных фторидов.

Note: x, y, z, p are stoichiometric coefficients in the formulas of double or triple fluorides.

Бромиды в виде самостоятельных фаз не обнаружены, но бром фиксируется в составе соединения, близкого к хлориду калия K(Cl, Br). Примеси фосфора фиксируются преимущественно в сульфатах, видимо, из-за возможности гетеровалентного замещения, а самостоятельных фосфатных фаз не отмечено. Из смешанных фторидов-хлоридов обнаружены составы Mg(F, Cl)₂, (Mg, Fe)(F, Cl)₂.

Сульфаты. Основным является сульфат кальция с различной степенью гидратированности, от ангидрита до гипса, в основном ангидрит. Довольно распространены минералы группы алунита и ярозита

$M^I M^{III}_3(SO_4)_2(OH)_6$, где M^I — H_3O^+ , NH_4^+ , Na^+ , K^+ , M^{III} — Al^{3+} , Fe^{3+} , как и на термальных полях современных геотермальных систем Камчатки. Они представляют собой продукт гидролиза сульфатов железа и алюминия, который интенсифицируется при нагревании, при этом образуется серная кислота: $M^I_2SO_4 + 3Al_2(SO_4)_3 + 12H_2O = 2M^I Al_3(SO_4)_2(OH)_6 + 6H_2SO_4$, M^I — Na^+ , K^+ , $Ca_{0,5}^{2+}$, NH_4^+ .

Из простых сульфатов отметим сульфаты магния, бария, железа (II). Встречаются составы, близкие к двойным сульфатам типа буссенготита $(NH_4)_2Mg(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ и сабиита $(NH_4) Fe(SO_4)_2$,

но не обнаружен коктаит $(\text{NH}_4)_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, кальциевый аналог буссенготита. Отметим, что кристаллогидраты при нагревании могут претерпевать дегидратацию, но при локальных понижениях температуры и увеличении влажности регидратироваться обратно. Аммоний исходно содержался в растворимом комплексе пепла вулкана Шивелуч, поэтому аммонийные соли ожидаемы. Присутствуют сложные сульфаты, по составу близкие к галотрихиту и пиккерингиту. Формирование сложных солей может идти как путем трансформации более простых сульфатов, так и путем выделения из растворов, если на каких-либо локальных участках для кристаллизации складываются благоприятные условия. В целом же, при повышенных температурах сложные сульфаты склонны к распаду на более простые, и к дегидратации.

Многочисленны продукты превращений сульфата железа (III), можно отметить составы, близкие к феррикопиапиту, ромбоклазу, пиракмониту, сабииту. Галотрихитовые минералы широко распространены на термоаномалиях, приуроченных к современным геотермальным системам Камчатки. Скорее всего, они маркируют сравнительно остывающие участки бескорневых фумарол, так как при нагреве дегидратируются, разлагаются. То же самое касается феррикопиапита и ромбоклаза, они образуются при сравнительно небольшом нагревании кристаллогидрата сульфата железа(III), который претерпевает гидролитический перитектоидный распад $10\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} = 6\text{HFe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + 3\text{Fe}_{2/3}\text{Fe}_4(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$.

Минерализация вторичных фумарол на пирокластическом потоке носит черты эвапоритовых и гидролитических процессов, протекающих при повышенных температурах. В соответствии с химической природой, соединения в отложениях кромок бескорневых фумарол образуются в результате испарения воды, механического переноса, а также в результате гидролиза, протекающего преимущественно с участием растворимых солей железа и алюминия. В зависимости от локальных условий, гидролиз солей трехвалентного железа и алюминия идет либо частично, до сульфатов типа феррикопиапита, алунитовых и ярозитовых минералов, либо до конца, с образованием гематита, цементирующего пирокластический песок. Аналогично гидролизуются соли алюминия, например, в фумаролах Толбачика обнаружен оксид алюминия со структурой шпинели, который, вероятно, имеет гидролитическое происхождение [64].

За несколько месяцев на кромке мощных вторичных фумарол образовалась «шапка» гематитовых отложений в ассоциации с алунитовыми, ангидритовыми, минералами, галитом. Свинец во вторичных фумаролах откладывается в виде хлорида, так как для него характерны прочные хлоридные комплексы, а также его соединения летучи при температуре в несколько сотен градусов [40, 22, 27]. Отсутствие флюорита можно объяснить тем, что при температурах выше 250°C растворимость флюорита становится выше растворимости сульфата кальция, и поэтому

образуется менее растворимый в фумарольных условиях CaSO_4 , ангидрит. А для магния растворимость фторида в температурном интервале до 350°C меньше растворимости сульфата, поэтому наблюдается обилие селлаита и отсутствие флюорита. Появление флюорита можно ожидать при понижении температуры, остывании вторичной фумаролы. Не отмечена мышьяковая минерализация, но встречается хлорид свинца с примесью сурьмы.

Состав минеральных ассоциаций тесно связан с составом растворимой части пирокластических потоков, которая по составу близка к растворимым солям изверженного пепла. Пирокластический поток перекрыл русло р. Кабеку, и под толщей 20–30 м оказались захоронены не только водотоки, но и интенсивно тающий снег, раскаленные глыбы. Подробные исследования пирокластических отложений приведены в работах [12, 17]. Вследствие воздействия метеорных вод на сошедший поток сформировались вторичные, бескорневые фумаролы с температурой на устье до 350°C , интенсивными фонтанами песка и целым спектром вторичных минералов. Состав минеральных ассоциаций определяется трансформацией растворенных солей пепла при нагревании.

Перенос вещества и формирование минерального состава в пределах бескорневых фумарол обусловливается как химической природой элементов, так и внешними условиями. Основными факторами, определяющими состав вторичных минералов бескорневых фумарол, являются: 1) резкое вскипание и испарение водного раствора, насыщенного солями пирокластического потока; 2) сублимация летучих соединений с последующим осаждением; 3) гидролиз горячим водяным паром.

Сульфат кальция в виде безводного ангидрита стабилен в широком температурном интервале, с нижней границей 40°C во влажных средах. Хлорид натрия, галит NaCl устойчивы в широком температурном диапазоне, поэтому оба эти минерала образуются при вскипании растворов, содержащих соли в растворенном виде, без значимых трансформаций. Ангидрит и галит пропитывают стенки вторичных фумарол, выступают в качестве цементирующего агента для кромок на устье.

Хлориды алюминия и железа(III) летучи и склонны к гидролизу, особенно при тех температурах, которые характерны для вторичных фумарол. Гидролиз хлорида железа(III) дает гематит, цементирующий стенки фумаролы наряду с галитом и ангидритом, а также составляющий значимую часть минерализации верхней кромок. Гидролиз сульфата железа(III) дает ряд продуктов: феррикопиапит, ромбоклаз, минералы группы ярозита, гематит. Ввиду того, что прочность сульфатных комплексов железа(III) сравнима с прочностью его гидроксокомплексов, наблюдается разнообразие гидролизанных сульфатных соединений железа. На поверхности пирокластического потока эти соли выступают в виде ореола, обрамляющего фумарольные выходы, аналогичную

картину можно наблюдать вокруг парогазовых струй на термальных полях Камчатки. Эти ореолы окрашены в различные оттенки желтого и оранжевого цвета, а в присутствии аммония окраска становится более насыщенной, ближе к оранжевому оттенку. Обычно желто-оранжевая кайма вокруг фумарол и парогазовых струй маркирует сравнительно остывающие участки, а более нагретые участки покрыты белыми солями.

При высоких температурах подвергаются гидролизу соли трехвалентного железа, в результате высвобождаются серная кислота и хлороводород, которые могут участвовать в процессах выщелачивания элементов из контактирующих минералов. Хлориды и фториды ряда элементов летучи, могут сублимироваться, такие галогениды переносятся от горячих к более холодным частям системы, где и осаждаются в виде устойчивых соединений. Взрывное испарение метеорной воды интенсифицирует активное перемещение в пределах бескорневой фумаролы, при этом соли могут переноситься и распыленным аэрозолем. Испарительное концентрирование при вскипании, гидролиз, сублимация с последующей конденсацией — основные процессы, формирующие минеральный состав в пределах вторичных фумарол.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе извержения вулкана Шивелуч 10–13 апреля 2023 г. лавовый купол был сильно разрушен, на юго-восточном склоне вулкана образовались отложения пирокластического потока, под многометровой толщей которых оказались погребены медленно остывающие и дегазирующие раскаленные глыбы лавы. В результате фильтрации сквозь отложения метеорных вод и нагрева их над лавовыми глыбами

до нескольких сотен градусов, вплоть до закритических температур, вода переходит в пар и вместе с газами, заключенными в толще пирокластических отложений, образует парогазовую смесь, выход которой на поверхность проявляется в виде воронок, иногда с фонтанирующим пеплом, с температурой на выходе ~300–350 °С. Минеральный состав отложений бескорневых фумарол определяется растворимыми солями изверженного материала, на бортах воронок доминируют сульфаты кальция, минералы группы алунита и ярозита, двойные и кислые сульфаты, гематит, галит.

Исследование минерального состава ассоциаций, образованных в воронках с фонтанирующим пеплом, подтвердило предварительные прогнозы: показало доминирование сульфата кальция различной степени гидратированности — гипса, бассанита, ангидрита, минералов группы алунита и ярозита, хлорида натрия — галита. Также отмечаются легоцит и его аналоги, условно обозначенные как $M^I_3N(SO_4)_2$. Сульфат трехвалентного железа в основном гидролизован, встречается феррикопиапит. Обнаружено обилие зерен хлорида свинца, фторида магния, сложных фторидов с алюминием. Формирование минеральных ассоциаций вторичных фумарол Шивелуча обусловлено испарительным концентрированием, гидролизом солей железа(III) и алюминия, сублимацией летучих соединений с последующей конденсацией на более холодных частях фумарол. Водорастворимые соли пеплов и пирокластических потоков послужили основой для формирования минералов на бортах воронок вторичных фумарол, которые формируются в результате взрывного испарения метеорных вод, достигших погребенных под толщей пирокластического материала раскаленных глыб лавы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башарина Л.А. Исследование газообразных продуктов вулканов Ключевского и Шивелуча в 1946–1947 гг. *Бюлл. вулканол. станций*. 1953. № 18. С. 31–40.
2. Башарина Л.А. Вулканические газы на различных стадиях активности вулканов. *Труды Лаборатории вулканологии*. М.: АН СССР, 1961. С. 69–79.
3. Башарина Л.А. Эксталяции базальтовых и андезитовых лав камчатских вулканов. *Труды Второго Всесоюзного вулканологического совещания «Современный вулканизм», 3–17 сентября 1964 г.* Т. 1. М.: Наука, 1966. С. 139–146.
4. Березин С.С., Завражнов А.Ю., Зломанов В.П. и др. Спектрофотометрическое *in situ* исследование состава насыщенных и ненасыщенных паров хлорида железа (III) при температурах 150–800 °С. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2014. Т. 16. № 4. С. 418–424.
5. Борисов О.Г. Особенности фумарольной деятельности на агломератовых отложениях вулкана Безымянный. *Труды Второго Всесоюзного вулканологического совещания «Современный вулканизм», 3–17 сентября 1964 г.* Т. 1. М.: Наука, 1966. С. 153–160.
6. Вергасова Л.П., Серафимова Е.К., Главатских С.Ф. Минералогия и геохимия возгонов. *Большое трещинное Толбачинское извержение (1975–1976 гг., Камчатка)*. М.: Наука, 1984. С. 341–356.
7. Виноградов О.П., Сидоров А.И., Климов В.А. и др. Особенности формирования микро- и нанокристаллов оксидов ванадия при газофазном методе синтеза. *Физика твердого тела*. 2008. Т. 50. № 7. С. 1177–1183.
8. Владимирова В.А., Сийдра О.И. Синтез и свойства синтетических аналогов природных минералов аверьевит $[Cu^{2+}_5O_2](VO_4)_2 \cdot n(Cu, Cs, Rb, K)Cl_x$ и ярошевскит $Cu_9O_2(VO_4)_4Cl_2$. *X Всероссийская молодежная научная*

конференция «Минералы: строение, свойства, методы исследования». Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2019. С. 50–53.

9. Высокоморная О.В., Пискунов М.В., Кузнецов Г.В. и др. Условия взрывного распада неоднородных капель воды при высокотемпературном нагреве. *Инженерно-физический журнал*. 2018. Т. 91. № 6. С. 1573–1582.
10. Гирина О.А. Конвективная гравитационная дифференциация пирокластики андезитовых вулканов. *Литосфера*. 2010. № 3. С. 135–144.
11. Гирина О.А. Пирокластические отложения извержения вулкана Безымянный в октябре 1984 г. *Вулканология и сейсмология*. 1990. № 3. С. 82–91.
12. Гирина О.А. *Пирокластические отложения современных извержений андезитовых вулканов Камчатки и их инженерно-геологические особенности*. Владивосток: Дальнаука, 1998. 174 с.
13. Гирина О.А., Демянчук Ю.В., Мельников Д.В. и др. Пароксизмальная фаза извержения вулкана Молодой Шивелуч, Камчатка, 27 февраля 2005 г. (предварительное сообщение). *Вулканология и сейсмология*. 2006. № 1. С. 16–23.
14. Гирина О.А., Нуждаев А.А. О некоторых особенностях извержения вулкана Молодой Шивелуч, Камчатка, 22 сентября 2005 г. *Вулканология и сейсмология*. 2014. № 4. С. 20–30. <https://doi.org/10.7868/S0203030614040038>
15. Гирина О.А., Лупян Е.А., Хорват А. и др. Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10–13 апреля 2023 г. на основе данных различных спутниковых систем. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 2. С. 283–291. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-2-283-291>
16. Гирина О.А., Ушаков С.В., Демянчук Ю.В. Пароксизмальное извержение вулкана Молодой Шивелуч, Камчатка, 9 мая 2004 г. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2007. № 2. Вып. 10. С. 65–73.
17. Горбач Н.В. Вулкан Старый Шивелуч: геологическое строение, реконструкция эруптивных центров и характер деятельности в позднем плейстоцене. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2011. № 1. Вып. 17. С. 77–90.
18. Горбач Н.В. Первый лавовый поток на экструзивном куполе вулкана Шивелуч, 2004 г. *Вулканология и сейсмология*. 2006. № 2. С. 9–16.
19. Горбач Н.В., Портнягин М.В. Геологическое строение и петрология лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч (Камчатка). *Петрология*. 2011. Т. 19. № 2. С. 140–172.
20. 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>
21. Горшков Г.С. Извержение сопки Безымянной (предварительное сообщение). *Бюлл. вулканол. станций*. 1957. № 26. С. 19–72.
22. Елшина Л.А., Кудяков В.Я., Молчанова Н.Г. Влияние состава солевого расплава, температуры и времени взаимодействия на реакцию контактного обмена в системах $MCl-PbCl_2-MeN$. *Атомная энергия*. 2008. Т. 104. № 6. С. 343–348.
23. Завражнов А.Ю., Наумов А.В., Сергеева А.В. и др. Селективный химический транспорт как метод изменения состава нестехиометрических сульфидов индия. *Неорганические материалы*. 2007. Т. 43. № 11. С. 1303–1315.
24. Зеленский М.Е. *Транспорт элементов и условия минералообразования в зонах разгрузки высокотемпературных фумарол на вулкане Мутновский (Камчатка)*: дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: Объединенный ин-т геологии, геофизики и минералогии им. А.А. Трофимука СО РАН, 2003. 20 с.
25. Лаврентьева Л.Г., Ивонин И.В. Основные этапы развития научного направления по эпитаكсии полупроводников в СФТИ. *Вестник Томского государственного университета*. 2005. № 285. С. 17–23.
26. Лаврентьева Л.Г., Вилисова М.Д., Ивонин И.В. Газофазовая эпитакция арсенида галлия. *Вестник Томского государственного университета*. 2005. № 285. С. 74–83.
27. Луканин О.А., Рыженко Б.Н., Куровская Н.А. Растворимость и формы нахождения цинка и свинца в водно-хлоридных флюидах при Т-Р параметрах, соответствующих дегазации и кристаллизации гранитоидных магм. *Геохимия*. 2013. № 10. С. 894. <https://doi.org/10.7868/S0016752513090045>
28. Малик Н.А. *Пеплы извержений вулканов Камчатки (2006–2013 гг.): состав, масса и водорастворимый комплекс*: дис. ... канд. геол.-мин. наук. Петропавловск-Камчатский, 2019. 28 с.
29. Малик Н.А., Округин В.М., Плутахина Е.Ю. и др. Таллий и мышьяк в продуктах деятельности Авачинского вулкана. *Материалы научной конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы», 28–29 марта 2019 г.* Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. С. 202–204.

30. Мелекесцев И.В., Волюнец О.Н., Ермаков В.А. и др. Вулкан Шивелуч. *Действующие вулканы Камчатки*. В 2 т. Т. 1 (Отв. ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков). М.: Наука, 1991. С. 84–103.
31. Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Шапарь В.Н. Химический состав и изотопные отношения газов пирокластических потоков извержения вулкана Безымянный в июле 1985 г. *Вулканология и сейсмология*. 1987. № 4. С. 40–49.
32. Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Шапарь В.Н. Геохимические особенности фумарольных газов на различных стадиях активности вулканов Тихоокеанского вулканического пояса. *Вулканология и сейсмология*. 1991. № 1. С. 79–92.
33. Набоко С.И. Возгоны вулкана Шивелуч. *Бюлл. вулканол. станций*. М.: АН СССР, 1953. № 18. С. 47–55.
34. Набоко С.И., Главатских С.Ф. Постэруптивный процесс. *Большое трещинное Толбачинское извержение (1975–1976 гг., Камчатка)*. М.: Наука, 1984. С. 309–341.
35. Овсянников А.А., Маневич А.Г. Извержение вулкана Шивелуч в октябре 2010 г. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2010. № 2. Вып. 16. С. 7–9.
36. Пеков И.В., Агаханов А.А., Зубкова Н.В. и др. Фумарольные системы окислительного типа на вулкане Толбачик — минералогический и геохимический уникум. *Геология и геофизика*. 2020. Т. 61. № 5–6. С. 826–843. <https://doi.org/10.15372/GiG2019167>
37. Печников А.И., Степанов С.И., Чижирыка А.В. и др. Толстые слои α - Ga_2O_3 на сапфировых подложках, полученные методом хлоридной эпитаксии. *Физика и техника полупроводников*. 2019. Т. 53. № 6. С. 789–792. <https://doi.org/10.21883/ФТР.2019.06.47730.9033>
38. Плутахина Е.Ю. Минеральный состав сублиматов лавовых потоков Толбачинского трещинного извержения 2012–2013 гг. (ТТИ-50, Камчатка). *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2023. № 20. С. 179–184.
39. Плутахина Е.Ю., Малик Н.А. Новые находки в сублиматах Авачинского вулкана. *Материалы научной конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы»*. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2023. С. 162–163.
40. Пронин В.П., Сенкевич С.В., Каптелов Е.Ю. и др. Аномальные потери свинца в тонких пленках PZT в процессе кристаллизации фазы перовскита. *Физика твердого тела*. 2013. Т. 55. № 1. С. 92.
41. Савенко А.В., Савенко В.С. Условия образования селлаита в соляных отложениях. *Вестник Московского университета. Сер. Геология*. 2021. № 5. С. 71–74.
42. Сергеева А.В., Гирина О.А., Назарова М.А. и др. Пепел вулкана Шивелуч (Камчатка, Россия), изверженный в апреле 2023 г. как источник водорастворимых солей. *Вулканология и сейсмология*. 2024. № 4. С. 3–20. <https://doi.org/10.31857/S0203030624040012>
43. Смирнов В.П., Киселев Д.С. Получение высокочистых монокристаллических W и W Nb методом химических транспортных реакций. *Неорганические материалы*. 2012. Т. 48. № 11. С. 1223–1226.
44. Федотов С.А., Жаринов Н.А., Двигало В.Н. и др. Эруптивный цикл вулкана Шивелуч в 2001–2004 гг. *Вулканология и сейсмология*. 2004. № 6. С. 3–14.
45. Barone G., De Giudici G., Gimeno D. et al. Surface reactivity of Etna volcanic ash and evaluation of health risks. *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 761. Art. 143248. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143248>
46. Balić-Žunić T., Garavelli A., Mitolo D. et al. Jakobssonite, CaAlF_5 , a new mineral from fumaroles at the Eldfell and Hekla volcanoes, Iceland. *Mineralogical Magazine*. 2012. Vol. 76. No. 3. Pp. 751–760. <https://doi.org/10.1180/minmag.2012.076.3.22>
47. Balić-Žunić T., Garavelli A., Pinto D. et al. Verneite, $\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{F}_{14}$, a New Aluminum Fluoride Mineral from Icelandic and Vesuvius Fumaroles. *Minerals*. 2018. Vol. 8. No. 553. <https://doi.org/10.3390/min8120553>
48. Breuer D., Hamilton C.W., Khurana K. The internal structure of Io. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*. 2022. Vol. 18. No. 6. Pp. 385–390. <https://doi.org/10.2138/gselements.18.6.385>
49. Bulakh M.O., Pekov I.V., Koshlyakova N.N. et al. Basalt Alteration in High-Temperature Oxidizing-Type Fumaroles at the Tolbachik Volcano (Kamchatka, Russia). Part 1: Processes and Products of Olivine Alteration. *Geology of Ore Deposits*. 2024a. Vol. 66. No. 8. Pp. 1057–1082. <https://doi.org/10.31857/S0869605523030036>
50. Bulakh M.O., Pekov I.V., Koshlyakova N.N. et al. Basalt Alteration in High-Temperature Oxidizing-Type Fumaroles at the Tolbachik Volcano (Kamchatka, Russia). Part 2: Gas Metasomatites. *Geology of Ore Deposits*. 2024b. Vol. 66. No. 8. Pp. 1083–1122. <https://doi.org/10.1134/S1075701524700259>
51. Campostrini I., Demartin F., Russo M. Sbacchiite, Ca_2AlF_7 , a new fumarolic mineral from the Vesuvius volcano, Napoli, Italy. *European Journal of Mineralogy*. 2019. Vol. 31. No. 1. Pp. 153–158. <https://doi.org/10.1127/ejm/2018/0030-2799>

52. Cronin S.J., Stewart C., Zernack A.V. et al. Volcanic ash leachate compositions and assessment of health and agricultural hazards from 2012 hydrothermal eruptions, Tongariro, New Zealand. *J. of Volcanol. and Geotherm. Res.* 2014. Vol. 286. Pp. 233–247. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.07.002>
53. Cuoco E., Tedesco D., Poreda R.J. et al. Impact of volcanic plume emissions on rain water chemistry during the January 2010 Nyamuragira eruptive event: implications for essential potable water resources. *J. of Hazardous Materials.* 2013. Vol. 244. Pp. 570–581. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.10.055>
54. Flaathen T.K., Gislason S.R. The effect of volcanic eruptions on the chemistry of surface waters: The 1991 and 2000 eruptions of Mt. Hekla, Iceland. *J. of Volcanol. and Geotherm. Res.* 2007. Vol. 164. No. 4. Pp. 293–316. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.05.014>
55. Donatella M., Garavelli A., Balić-Žunić T. et al. Leonardsenite, $MgAlF_5(H_2O)_2$, a new mineral species from Eldfell volcano, Heimaey Island, Iceland. *The Canadian Mineralogist.* 2013. Vol. 51. No. 3. Pp. 377–386. <https://doi.org/10.3749/canmin.51.3.377>
56. Garavelli A., Pinto D., Mitolo D. et al. Thermessaite- (NH_4) , $(NH_4)_2AlF_3(SO_4)$, a new fumarole mineral from La Fossa crater at Vulcano, Aeolian Islands, Italy. *Mineralogical Magazine.* 2021. Vol. 85. No. 5. Pp. 665–672. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.69>
57. Gilmore M.S., M. Dyar D., Mueller N. et al. Mineralogy of the Venus surface. *Space Science Reviews.* 2023. Vol. 219. No. 7. P. 52. <https://doi.org/10.1007/s11214-023-00988-6>
58. Okrugin V., Favero M., Liu A. et al. Smoking gun for thallium geochemistry in volcanic arcs: Nataliyamalikite, TII, a new thallium mineral from an active fumarole at Avacha Volcano, Kamchatka Peninsula, Russia. *Am. Mineral.* 2017. Vol. 102. Pp. 1736–1746. <https://doi.org/10.2138/am-2017-6057>
59. Ozerov A.Yu., Girina O.A., Zharinov N.A. et al. Eruptions in the Northern Group of Volcanoes in Kamchatka during the Early 21st Century. *J. of Volcanol. and Seismol.* 2020. Vol. 14. No. 1. Pp. 1–17. <https://doi.org/10.1134/S0742046320010054>
60. Pauly H. Ralstonite from Ivigtut, South Greenland. *J. of Earth and Planetary Materials.* 1965. Vol. 50. No. 11/12. Pp. 1851–1864.
61. Papike J.J., Terry E.C., Keith M.N. et al. Geochemistry and mineralogy of fumarolic deposits, Valley of Ten Thousand Smokes, Alaska: Bulk chemical and mineralogical evolution of dacite-rich protolith. *American Mineralogist.* 1991. Vol. 76. No. 9–10. Pp. 1662–1673.
62. Pecharsky V.K., Zavalij P.Y. The powder diffraction pattern. *Fundamentals of Powder Diffraction and Structural Characterization of Materials.* 2009. Pp. 151–202. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09579-08>
63. Pekov I.V., Yapaskurt V.O., Britvin S.N. et al. Romanorlovite, a new copper and potassium hydroxychloride from the Tolbachik volcano, Kamchatka, Russia. *Geology of Ore Deposits.* 2017. Vol. 59. Pp. 601–608. <https://doi.org/10.1134/S107570151707008X>
64. Pekov I.V., Anikin I.P., Chukanov N.V. et al. Deltalumite, a new natural modification of alumina with a spinel-type structure. *Geology of Ore Deposits.* 2020. Vol. 62. Pp. 608–617. <https://doi.org/10.1134/S1075701520070089>
65. Sandalov F.D., Shchipalkina N.V., Pekov I.V. et al. Cristobalite and tridymite from the Arsenatnaya fumarole deposits (Tolbachik Volcano, Kamchatka, Russia). *Moscow University Geology Bulletin.* 2021. Vol. 76. Pp. 325–335. <https://doi.org/10.3103/S0145875221030108>
66. Schipper C.I., Mandon C., Maksimenko A. et al. Vapor-phase cristobalite as a durable indicator of magmatic pore structure and halogen degassing: an example from White Island volcano (New Zealand). *Bull. of Volcanology.* 2017. Vol. 79. Pp. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1157-1>
67. Schipper C.I., Rickard W.D., Reddy S.M. et al. Volcanic SiO_2 -cristobalite: A natural product of chemical vapor deposition. *Am. Mineral.* 2020. Vol. 105. No. 4. Pp. 510–524. <https://doi.org/10.2138/am-2020-7236>
68. Shevko E.P., Bortnikova S.B., Abrosimova N.A. et al. Trace elements and minerals in fumarolic sulfur: the case of Ebeko Volcano, Kuriles. *Geofluids.* 2018. Vol. 2018. No. 1. P. 4586363. <https://doi.org/10.1155/2018/4586363>
69. Stewart C., Johnston D.M., Leonard G.S. et al. Contamination of water supplies by volcanic ashfall: a literature review and simple impact modelling. *J. of Volcanol. and Geotherm. Res.* 2006. Vol. 158. No. 3–4. Pp. 296–306. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.07.002>
70. Vila J.A., Bia G.L., Bengió S. et al. Surface acid alteration of juvenile Andean pyroclastic rocks: effect of glass composition on the development of surface fluoride-bearing minerals. *Chemical Geology.* 2025. Vol. 673. Pp. 122549. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.122549>
71. Zelensky M., Bortnikova S. Sublimate speciation at Mutnovsky volcano, Kamchatka. *European Journal of Mineralogy.* 2005. Vol. 17. Pp. 107–118. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2005/0017-107>
72. Wilson T., Stewart C., Cole J. et al. Vulnerability of farm water supply systems to volcanic ash fall. *Environmental Earth Sciences.* 2010. Vol. 61. Pp. 675–688. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0380-2>

73. Wilson T.M., Stewart C., Sword-Daniels V. et al. Volcanic ash impacts on critical infrastructure. *Physics and Chemistry of the Earth. Parts a/b/c*. 2012. Vol. 45. Pp. 5–23. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.06.006>

REFERENCES

1. Basharina L.A. Study of gaseous products of the Klyuchevskoy and Sheveluch volcanoes in 1946–1947. *Byull. Vulkanol. Stantsii*. 1953;(18):31–40. (In Russ.).
2. Basharina L.A. Volcanic gases at different stages of volcanic activity. *Proc. of the Laboratory of Volcanology*. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1961:69–79. (In Russ.).
3. Basharina L.A. Exhalations of basaltic and andesitic lavas of Kamchatka volcanoes. *Trudy II Vsesoyuznogo vulkanologicheskogo soveshchaniya “Sovermenniy vulkanizm” (Proc. of the Second all-union volcanological conference “Modern Volcanism”), September 3–17, 1964*. Moscow: Nauka, 1966;1:139–146. (In Russ.).
4. Berezin S.S., Zavrazhnov A.Yu., Zlomanov V.P. et al. In situ spectrophotometric study of the composition of saturated and unsaturated iron (III) chloride vapors at temperatures of 150–800 °C. *Condensed Matter and Interphases*. 2014;16(4):418–424. (In Russ.).
5. Borisov O.G. Features of fumarole activity on agglomerate deposits of the Bezymianny volcano. *Trudy II Vsesoyuznogo vulkanologicheskogo soveshchaniya “Sovermenniy vulkanizm” (Proc. II All-Union Volcanological Conference “Modern Volcanism”), September 3–17, 1964*. Moscow: Nauka, 1966;1:153–160. (In Russ.).
6. Vergasova L.P., Seraphimova E.K., Glavatskikh S.F. Mineralogy and geochemistry of sublimates. *Large Tolbachik fissure eruption (1975–1976, Kamchatka)*. Moscow: Nauka, 1984:341–356. (In Russ.).
7. Vinogradova O.P., Sidorov A.I., Klimov V.A. et al. Specific features of the formation of vanadium oxide micro- and nanocrystals during gas-phase synthesis. *Physics of the Solid State*. 2008;50(7):1227–1233. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1063783408070068>
8. Vladimirova V.A., Siidra O.I. Synthesis and properties of synthetic analogues of natural minerals averievite $[\text{Cu}^{2+}_5\text{O}_2](\text{VO}_4)_2 \cdot n(\text{Cu}, \text{Cs}, \text{Rb}, \text{K})\text{Cl}_x$, and yaroshevskit $\text{Cu}_9\text{O}_2(\text{VO}_4)_4\text{Cl}_2$. *Minerals: structure, properties, research methods (Proc. X All-Russian youth scientific conference)*. Yekaterinburg: Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2019:50–53. (In Russ.).
9. Vysokomornaya O.V., Piskunov M.V., Kuznetsov G.V. et al. Conditions for explosive disintegration of inhomogeneous water droplets on high-temperature heating. *J. Engineering Physics and Thermophysics*. 2018;91(6):1573–1582. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1885-x>
10. Girina O.A. Convective gravitational differentiation of the andesite volcanoes pyroclastics. *Lithosphere*. 2010;(3):135–144. (In Russ.).
11. Girina O.A. Pyroclastic deposits of the Bezymianny eruption in October 1984. *Vulkanol. Seismol.* 1991;12(3):407–417. (In Russ.).
12. Girina O.A. *Pyroclastic deposits from recent andesitic volcano eruptions in Kamchatka and their engineering-geological features*. Vladivostok: Dalnauka, 1998:174 p. (In Russ.).
13. Girina O.A., Demyanchuk Yu.V., Melnikov D.V. et al. The paroxysmal phase during the eruption of Molodoi Shiveluch Volcano, Kamchatka, February 27, 2005 (A preliminary report). *Vulkanol. Seismol.* 2006;(1):16–23. (In Russ.).
14. Girina O.A., Nuzhdaev A.A. On Some Features Peculiar to the September 22, 2005 Eruption of Young Shiveluch Volcano, Kamchatka. *J. of Volcanol. and Seismol.* 2014;8(4):218–227. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0742046314040034>
15. Girina O.A., Loupian E.A., Horvath A. et al. Analysis of the development of the paroxysmal eruption of the Sheveluch Volcano on April 10–13, 2023, based on data from various satellite systems. *Cosmic Research*. 2023;61(1):S182–S187. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0010952523700533>
16. Girina O.A., Ushakov S.V., Demyanchuk Yu.V. The May 9, 2004 paroxysmal eruption of Young Sheveluch Volcano, Kamchatka. *Vestnik KRAUNTs, Nauki o Zemle*. 2007;(2(10)):65–73. (In Russ.). http://www.kscnet.ru/kraesc/2007/2007_10/art9.pdf
17. Gorbach N.V. The first lava flow on the extrusive dome of Shiveluch volcano, 2004. *Vulkanol. Seismol.* 2006;(2):9–16. (In Russ.).
18. Gorbach N.V. Old Shiveluch volcano: geological structure, eruptive centers reconstruction, the features of the Late Pleistocene volcanic activity. *Vestnik KRAUNTs, Nauki o Zemle*. 2011;17(1):77–90. (In Russ.).
19. Gorbach N.V., Portnyagin M.V. Geology and petrology of the lava complex of Young Shiveluch Volcano, Kamchatka. *Petrology*. 2011;19(2):134–166. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0869591111020068>

20. Gorbach N.V., Portnyagin M.V., Filosofova T.M. Dynamics of extrusive dome growth and variations in the chemical and mineralogical compositions of Young Shiveluch andesites in 2001–2013. *J. of Volcanol. and Seismol.* 2016;10(6):360–381. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0742046316060038>
21. Gorshkov G.S. Gigantic eruption of the Volcano Bezymianny. *Bull. Volcanol.* 1959;20:77–109. (In Russ.).
22. Elshina L.A., Kudiyakov V.Ya., Molchanova N.G. Effect of the salt melt composition, temperature, and interaction time on the contact exchange reaction in the $MCl-PbCl_2-MeN$ systems. *Atomic Energy.* 2008;104(6):450–455. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s10512-008-9054-5>
23. Zavrazhnov A.Yu., Naumov A.V., Sergeeva A.V. et al. Selective chemical vapor transport as a means of varying the composition of nonstoichiometric indium sulfides. *Inorganic materials.* 2007;43:1167–1178. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0020168507110039>
24. Zelensky M.E. *Transport of elements and conditions of mineral formation in the discharge zones of high-temperature fumaroles on Mutnovsky volcano (Kamchatka)*. [Dissertation]. Novosibirsk: A.A. Trofimuk Joint Institute of Geology, Geophysics and Mineralogy, Siberian Branch RAS, 2003:20 p. (In Russ.).
25. Lavrentyeva L.G., Ivonin I.V. The main stages of the scientific direction development on epitaxy of semiconductors at SIPT. *Bull. Tomsk State University.* 2005;(285):17–23. (In Russ.).
26. Lavrentyeva L.G., Vilisova M.D., Ivonin I.V. Gas-phase epitaxy of gallium arsenide. *Bull. Tomsk State University.* 2005;(285):74–83. (In Russ.).
27. Lukanin O.A., Ryzhenko B.N., Kurovskaya N.A. Zn and Pb solubility and speciation in aqueous chloride fluids at T-P parameters corresponding to granitoid magma degassing and crystallization. *Geochemistry.* 2013;51:802–830. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0016702913090048>
28. Malik N.A. *Ashes of Kamchatka volcanoes eruptions (2006–2013): composition, mass, and water-soluble complex*. [Dissertation]. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2019:28 p. (In Russ.).
29. Malik N.A., Okrugin V.M., Plutakhina E.Yu. et al. Thallium and arsenic in the products of Avachinsky volcano activity. *Volcanism and Associated Processes (Proc. of the scientific conference, 28–29 March 2019)*. Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS FEB RAS, 2019:202–204. (In Russ.).
30. Melekestsev I.V., Volynets O.N., Ermakov V.A. et al. Sheveluch Volcano. *Deistvuyushchie vulkany Kamchatki (Active Volcanoes of Kamchatka)*. Moscow: Nauka, 1991;(1):98–103. (In Russ.).
31. Menyailov I.A., Nikitina L.P., Shapar V.N. Chemical composition and isotope ratios of gases from pyroclastic flows in the July 1985 eruption of Bezmyannyi. *Volcanol. Seismol.* 1990;9(4):557–572. (In Russ.).
32. Menyailov I.A., Nikitina L.P., Shapar V.N. The geochemistry of fumarolic gases at various phases of volcanic activity on volcanoes of the Circum-Pacific belt. *Volcanol. Seismol.* 1992;13(1):86–101. (In Russ.).
33. Naboko S.I. Sublimates of Sheveluch volcano. *Byull. Vulcanol. St.* 1953;(18):47–55. (In Russ.).
34. Naboko S.I., Glavatskikh S.F. Post-eruptive process. *Large Tolbachik fissure eruption (1975–1976, Kamchatka)*. Moscow: Nauka, 1984:309–341. (In Russ.).
35. Ovsyannikov A.A., Manevich A.G. The October 2010 eruption of Sheveluch Volcano. *Vestnik KRAUNTs, Nauki o Zemle.* 2010;(2(16)):7–9. (In Russ.).
36. Pekov I.V., Agakhanov A.A., Zubkova N.V. et al. Oxidizing-Type Fumaroles of the Tolbachik Volcano, a Mineralogical and Geochemical Unique. *Russian Geology and Geophysics.* 2020;61(5–6):675–688. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/RGG2019167>
37. Pechnikov A.I., Stepanov S.I., Chikiryaka A.V. et al. Thick α - Ga_2O_3 layers on sapphire substrates grown by halide epitaxy. *Semiconductors.* 2019;53(6):780–783. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1063782619060150>
38. Plutakhina E.Yu. Mineral composition of sublimates of the 2012–2013 Tolbachik fissure eruption lava flows (TFE-50, Kamchatka). *Proc. of the Fersman scientific session of Geological Institute of the Kola Science Center RAS.* 2023;(20):179–184. (In Russ.).
39. Plutakhina E.Yu., Malik N.A. New findings in the sublimates of Avacha volcano. *Volcanism and Associated Processes (Proc. of the scientific conference, 30–31 March 2023)*. Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS FEB RAS, 2023:162–163. (In Russ.).
40. Pronin V.P., Senkevich S.V., Kaptelov E.Yu. et al. Anomalous losses of lead in crystallization of the perovskite phase in thin PZT films. *Physics of the Solid State.* 2013;55:105–108. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1063783413010277>
41. Savenko A.V., Savenko V.S. Conditions of sellaite formation in salt deposits. *Moscow University Geology Bulletin.* 2021;76:656–658. (In Russ.). <https://doi.org/10.3103/S0145875221060065>
42. Sergeeva A.V., Girina O.A., Nazarova M.A. et al. The ash discharged by Sheveluch Volcano (Kamchatka, Russia) in April 2023 as a source of water-soluble salts. *J. of Volcanol. and Seismol.* 2024;18(4):307–322. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0742046324700684>

43. Smirnov V.P., Kiselev D.S. Preparation of high-purity single-crystal W and W(Nb) via chemical vapor transport. *Inorganic materials*. 2012;48:1093–1095. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0020168512110131>
44. Fedotov S.A., Zharinov N.A., Dvigalo V.N. et al. The 2001–2004 eruption cycle of Sheveluch Volcano. *Vulkanol. Seismol.* 2004;(6):3–14. (In Russ.).
45. Barone G., De Giudici G., Gimeno D. et al. Surface reactivity of Etna volcanic ash and evaluation of health risks. *Science of the Total Environment*. 2021;761:143248. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143248>
46. Balić-Žunić T., Garavelli A., Mitolo D. et al. Jakobssonite, CaAlF_5 , a new mineral from fumaroles at the Eldfell and Hekla volcanoes, Iceland. *Mineralogical Magazine*. 2012;76(3): <https://doi.org/10.1180/minmag.2012.076.3.22>
47. Balić-Žunić T., Garavelli A., Pinto D. et al. Verneite, $\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{F}_{14}$, a new aluminum fluoride mineral from Icelandic and Vesuvius fumaroles. *Minerals*. 2018;8(553). <https://doi.org/10.3390/min8120553>
48. Breuer D., Hamilton C.W., Khurana K. The internal structure of Io. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*. 2022;18(6):385–390. <https://doi.org/10.2138/gselements.18.6.385>
49. Bulakh M.O., Pekov I.V., Koshlyakova N.N. et al. Basalt alteration in high-temperature oxidizing-type fumaroles at the Tolbachik Volcano (Kamchatka, Russia). Part 1: Processes and products of olivine alteration. *Geology of Ore Deposits*. 2024a;66(8):1057–1082. <https://doi.org/10.31857/S0869605523030036>
50. Bulakh M.O., Pekov I.V., Koshlyakova N.N. et al. Basalt alteration in high-temperature oxidizing-type fumaroles at the Tolbachik Volcano (Kamchatka, Russia). Part 2: Gas metasomatites. *Geology of Ore Deposits*. 2024b;66(8):1083–1122. <https://doi.org/10.1134/S1075701524700259>
51. Campostrini I., Demartin F., Russo M. Sbacchiite, Ca_2AlF_7 , a new fumarolic mineral from the Vesuvius volcano, Napoli, Italy. *European Journal of Mineralogy*. 2019;31(1):153–158. <https://doi.org/10.1127/ejm/2018/0030-2799>
52. Cronin S.J., Stewart C., Zernack A.V. et al. Volcanic ash leachate compositions and assessment of health and agricultural hazards from 2012 hydrothermal eruptions, Tongariro, New Zealand. *J. of Volcanol. and Geotherm. Res.* 2014;286:233–247. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.07.002>
53. Cuoco E., Tedesco D., Poreda R.J. et al. Impact of volcanic plume emissions on rain water chemistry during the January 2010 Nyamuragira eruptive event: implications for essential potable water resources. *J. of Hazardous Materials*. 2013;244:570–581. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.10.055>
54. Flaathen T.K., Gislason S.R. The effect of volcanic eruptions on the chemistry of surface waters: The 1991 and 2000 eruptions of Mt. Hekla, Iceland. *J. of Volcanol. and Geotherm. Res.* 2007;164(4):Pp. 293–316. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.05.014>
55. Donatella M., Garavelli A., Balić-Žunić T. et al. Leonardsenite, $\text{MgAlF}_5(\text{H}_2\text{O})_2$, a new mineral species from Eldfell volcano, Heimaey Island, Iceland. *The Canadian Mineralogist*. 2013;51(3):377–386. <https://doi.org/10.3749/canmin.51.3.377>
56. Garavelli A., Pinto D., Mitolo D. et al. Thermessaitite-(NH_4), $(\text{NH}_4)_2\text{AlF}_3(\text{SO}_4)$, a new fumarole mineral from La Fossa crater at Vulcano, Aeolian Islands, Italy. *Mineralogical Magazine*. 2021;85(5):665–672. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.69>
57. Gilmore M.S., M. Dyar D., Mueller N. et al. Mineralogy of the Venus surface. *Space Science Reviews*. 2023;219(7):52. <https://doi.org/10.1007/s11214-023-00988-6>
58. Okrugin V., Favero M., Liu A. et al. Smoking gun for thallium geochemistry in volcanic arcs: Nataliyamalikitte, TII, a new thallium mineral from an active fumarole at Avacha Volcano, Kamchatka Peninsula, Russia. *Am. Mineral.* 2017;102:1736–1746. <https://doi.org/10.2138/am-2017-6057>
59. Ozerov A.Yu., Girina O.A., Zharinov N.A. et al. Eruptions in the Northern group of volcanoes in Kamchatka during the Early 21st Century. *J. of Volcanol. and Seismol.* 2020;14(1):1–17. <https://doi.org/10.1134/S0742046320010054>
60. Pauly H. Ralstonite from Ivigtut, South Greenland. *J. of Earth and Planetary Materials*. 1965;50(11/12):1851–1864.
61. Papike J.J., Terry E.C., Keith M.N. et al. Geochemistry and mineralogy of fumarolic deposits, Valley of Ten Thousand Smokes, Alaska: Bulk chemical and mineralogical evolution of dacite-rich protolith. *American Mineralogist*. 1991;76(9–10):1662–1673.
62. Pecharsky V.K., Zavalij P.Y. The powder diffraction pattern. *Fundamentals of Powder Diffraction and Structural Characterization of Materials*. Boston, MA: Springer US, 2009:151–202. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09579-08>
63. Pekov I.V., Yapaskurt V.O., Britvin S.N. et al. Romanorlovite, a new copper and potassium hydroxychloride from the Tolbachik volcano, Kamchatka, Russia. *Geology of Ore Deposits*. 2017;59:601–608. <https://doi.org/10.1134/S107570151707008X>
64. Pekov I.V., Anikin I.P., Chukanov N.V. et al. Deltalumite, a new natural modification of alumina with a spinel-type structure. *Geology of Ore Deposits*. 2020;62:608–617. <https://doi.org/10.1134/S1075701520070089>

65. Sandalov F.D., Shchipalkina N.V., Pekov I.V. et al. Cristobalite and tridymite from the Arsenatnaya fumarole deposits (Tolbachik Volcano, Kamchatka, Russia). *Moscow University Geology Bulletin*. 2021;76:325–335. <https://doi.org/10.3103/S0145875221030108>
66. Schipper C.I., Mandon C., Maksimenko A. et al. Vapor-phase cristobalite as a durable indicator of magmatic pore structure and halogen degassing: an example from White Island volcano (New Zealand). *Bull. of Volcanology*. 2017;79:1–14. <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1157-1>
67. Schipper C.I., Rickard W.D., Reddy S.M. et al. Volcanic SiO₂-cristobalite: A natural product of chemical vapor deposition. *Am. Mineral*. 2020;105(4):510–524. <https://doi.org/10.2138/am-2020-7236>
68. Shevko E.P., Bortnikova S.B., Abrosimova N.A. et al. Trace elements and minerals in fumarolic sulfur: the case of Ebeko Volcano, Kuriles. *Geofluids*. 2018;2018(1):4586363. <https://doi.org/10.1155/2018/4586363>
69. Stewart C., Johnston D.M., Leonard G.S. et al. Contamination of water supplies by volcanic ashfall: a literature review and simple impact modelling. *J. of Volcanol. and Geotherm. Res.* 2006;158(3–4):296–306. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.07.002>
70. Vila J.A., Bia G.L., Bengiό S. et al. Surface acid alteration of juvenile Andean pyroclastic rocks: effect of glass composition on the development of surface fluoride-bearing minerals. *Chemical Geology*. 2025;673:122549. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.122549>
71. Zelensky M., Bortnikova S. Sublimate speciation at Mutnovsky volcano, Kamchatka. *European Journal of Mineralogy*. 2005;17:107–118. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2005/0017-107>
72. Wilson T., Stewart C., Cole J. et al. Vulnerability of farm water supply systems to volcanic ash fall. *Environmental Earth Sciences*. 2010;61:675–688. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0380-2>
73. Wilson T.M., Stewart C., Sword-Daniels V. et al. Volcanic ash impacts on critical infrastructure. *Physics and Chemistry of the Earth. Parts a/b/c*. 2012;45:5–23. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.06.006>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Сергеева Анастасия Валерьевна — канд. хим. наук; ст. науч. сотрудник, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация
E-mail: anastavalers@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5127-347X>

Sergeeva, Anastasia V. — Cand. Sc. (Chemistry); Senior Research Officer, Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation
E-mail: anastavalers@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5127-347X>

Гирина Ольга Алексеевна — канд. геол.-минерал. наук; вед. науч. сотрудник, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация
E-mail: girina@kscnet.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4918-2338>

Girina, Olga A. — Cand. Sc. (Geology and Mineralogy); Head Scientist Researcher, Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation
E-mail: girina@kscnet.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4918-2338>

Кудаева Шарапат Сабировна — мл. науч. сотрудник, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация
E-mail: kudaeva.sharapat@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8236-1445>

Kudaeva, Sharapat S. — Research Assistant, Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation
E-mail: kudaeva.sharapat@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8236-1445>

Фролов Виктор Ильич — научный сотрудник, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация
E-mail: frolovvi91@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0007-2732-5656>

Frolov, Viktor I. — Research Officer, Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation
E-mail: frolovvi91@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0007-2732-5656>

Назарова Мария Анатольевна — мл. науч. сотрудник,
Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация
E-mail: nazarmar1@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6839-6599>

Nazarova, Maria A. — Research Assistant, Institute of
Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the
Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky,
Russian Federation
E-mail: nazarmar1@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6839-6599>

Карташева Елена Вячеславовна — науч. сотрудник,
Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация
E-mail: analytic@kscnet.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0518-7412>

Kartasheva, Elena V. — Research Officer, Institute of
Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the
Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky,
Russian Federation
E-mail: analytic@kscnet.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0518-7412>

Кузьмина Анна Александровна — мл. науч. сотруд-
ник, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация
E-mail: kuzmina@kscnet.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1428-6447>

Kuzmina Anna Aleksandrovna — Research Assistant, Ins-
titute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kam-
chatsky, Russian Federation
E-mail: kuzmina@kscnet.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1428-6447>

Поступила в редакцию 21.03.2025
После доработки 18.08.2025
Принята к публикации 19.11.2025

Received March 21, 2025
Revised August 18, 2025
Accepted November 19, 2025