



<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-2-57-67>
УДК 551.21 (552.11)



ПЕТРОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ ПЕМЗЫ ВУЛКАНА ПИК САРЫЧЕВА, О. МАТУА, ЦЕНТРАЛЬНЫЕ КУРИЛЫ

В.М. ОКРУГИН, Е.Д. СКИЛЬСКАЯ*, С.В. МОСКАЛЕВА

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
9, бульвар Пийпа, г. Петропавловск-Камчатский 683006, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье изложены первые результаты минералого-петрографического изучения пемзы вулкана Пик Сарычева, о. Матуа, Центральные Курилы.

Цель: реконструировать составы магматических расплавов кальдерообразующего извержения вулкана пра-Матуа.

Материалы и методы. Основными методами исследования стали рентгенофазовый анализ на содержание петрогенных, редких и рассеянных элементов и электронно-зондовый микроанализ для изучения вариаций химических составов минералов — вкрапленников пемз.

Результаты и заключение. По содержанию SiO_2 и суммы щелочей состав пемзы меняется от андезибазальтов ($\text{SiO}_2 = 55,94$ мас.%) до дацитов ($\text{SiO}_2 = 67,70$ мас.%). По содержанию K_2O пемзы относятся к умеренно-калиевой серии пород. Минералы-вкрапленники, представленные плагиоклазом, амфиболом, апатитом и Fe-Ti оксидами, кристаллизовались близодновременно из водонасыщенного магматического расплава при давлении примерно 1,5—2,2 кбар. Магматический расплав был обогащен летучими компонентами H_2O , CO_2 , S, F и Cl.

Ключевые слова: пемза, амфибол, плагиоклаз, стекло, вулкан Пик Сарычева, Курилы

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследования проведены по теме НИР лаборатории вулканогенного рудообразования № 0282-2019-0007.

Благодарности: Авторы благодарят Русское географическое общество в лице И.В. Витер и Е.М. Верещаги за приглашение к участию в комплексных XXI и XXII Курило-Камчатской экспедиции в 2017 и 2018 гг. с возможностью проведения детальных геологических работ и отбора представительного каменного материала. Изготовление полированных аншлифов и шлифов было выполнено ст. инженером В.В. Куликовым и инженером А.А. Платоновым. За помощь в расчете кристаллохимических формул авторы благодарят В.В. Ананьева.

Для цитирования: Округин В.М., Скильская Е.Д., Москалева С.В. Петрохимия и минералогия пемзы вулкана Пик Сарычева, о. Матуа, Центральные Курилы. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2022;64(2):57—67. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-2-57-67>

Статья поступила в редакцию 26.10.2021

Принята к публикации 05.09.2022

Опубликована 15.09.2022

* Автор, ответственный за переписку

PETROCHEMISTRY AND MINERALOGY OF PUMICE FROM THE SARYCHEV PEAK VOLCANO, MATUA ISLAND, CENTRAL KURIL ISLAND

VIKTOR M. OKRUGIN, ELENA D. SKILSKAIA*, SVETLANA V. MOSKALEVA

*Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch, RAS
9, Boulevard Piip, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia*

ABSTRACT

Background. The article presents the first results of a mineralogical and petrographic study of the pumice of the Sarychev Peak volcano, Matua island, the Central Kuril islands.

Aim. To reconstruct the compositions of magmatic melts of a caldera-forming eruption of the proto-Matua volcano.

Materials and methods. The main research methods included an X-ray fluorescence spectral analysis to determine the content of petrogenic, rare and trace elements, as well as an electron-probe microanalysis to study variations in the chemical composition of mineral inclusions of pumice.

Results and conclusion. According to the content of SiO_2 and the sum of alkalis, the composition of pumice varies from andesibasalts ($\text{SiO}_2 = 55.94$ wt.%) to dacites ($\text{SiO}_2 = 67.70$ wt.%). According to the content of K_2O , pumice can be classified as a moderate-potassium series of rocks. The inclusion minerals represented by plagioclase, amphibole, apatite and Fe-Ti oxides were crystallized at the same time from a water-saturated magmatic melt at a pressure of about 1.5–2.2 kbar. The igneous melt was enriched with volatile components of H_2O , CO_2 , S, F and Cl.

Keywords: pumice, amphibole, plagioclase, glass, Sarychev Peak volcano, Kuril islands

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: research was carried out on the subject of the State Assignment of the IVIS FEB RAS No. 0282-2019-0007.

Acknowledgments: The authors thank the Russian Geographic Society represented by I.M. Viter and E.M. Vereshchaga for the invitation to participate in XXI and XXII Kurile-Kamchatka expeditions in 2017 and 2018. Authors thank V.V. Kulikov and A.A. Platonov for the preparation of the polish sections for detailed ingestions. The authors also thank Ananyev V.V. for a help in calculating the minerals formulas.

For citation: Okrugin V.M., Skilskia E.D., Moskaleva S.V. Petrochemistry and mineralogy of pumice from the Sarychev Peak Volcano, Matua Island, Central Kuril Island. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2022;64(2):57–67. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-2-57-67>

Manuscript received 26 October 2021

Accepted 5 September 2022

Published 15 September 2022

* Corresponding author

Пемзы относятся к высокопористым вулканическим породам — продуктам кислого вулканизма, широко проявленного в островных дугах Тихого океана. Образование огромных толщ пемзового вулканического материала связывают с катастрофическими вулканическими извержениями плинийского типа, при которых часто образуются гигантские кальдеры или воронки взрыва типа Курильского озера на Камчатке и озеро Тоя

на о. Хоккайдо (Япония). Наиболее масштабно кислый вулканизм Курило-Камчатской островной дуги проявился в четвертичное время, где основными центрами его проявления стали кольцевая структура Курильское озеро, вулканы Ксудач, Семячинский и Карымский (Восточно-Камчатский вулканический фронт), кальдеры перешейка Ветровой, Тао-Русыр и Львиная пасть (Курильские острова). По подсчетам Э.Н. Эрлих

и И.В. Мелекесцева, суммарный объем выброшенного кислого пирокластического материала на Курильских островах составил примерно 250—300 км³, при этом более половины было произведено при извержениях кальдер Тао-Русыр и Львиная пасть [12].

Остров-вулкан Матуа площадью 52 км² располагается в самом центре Большой Курильской гряды по соседству с такими же небольшими вулканическими островами — Райкоке на севере и Расшуа на юге (рис. 1). В километре к востоку от острова Матуа расположен небольшой остров Топорковый, происхождение которого остается неизвестным. Большую часть острова Матуа занимает двух-

компонентная вулканическая постройка по типу сомма-везувий. Современный действующий вулкан Пик Сарычева (1446 м), известный мощными главным образом эксплозивными извержениями, находится в кальдере соммы вулкана Матуа. Среди десятка известных вулканических извержений четыре (~1760, 1930, 1946 и 2009 гг.) относятся к крупнейшим. Извержения преимущественно носили эксплозивный характер различной мощности и продолжались от нескольких часов до нескольких дней [2, 3]. Последнему сильному эксплозивно-эффузивному извержению вулкана в июне 2009 г. был присвоен эксплозивный индекс 4. Пепловые выбросы достигали 8—16 км

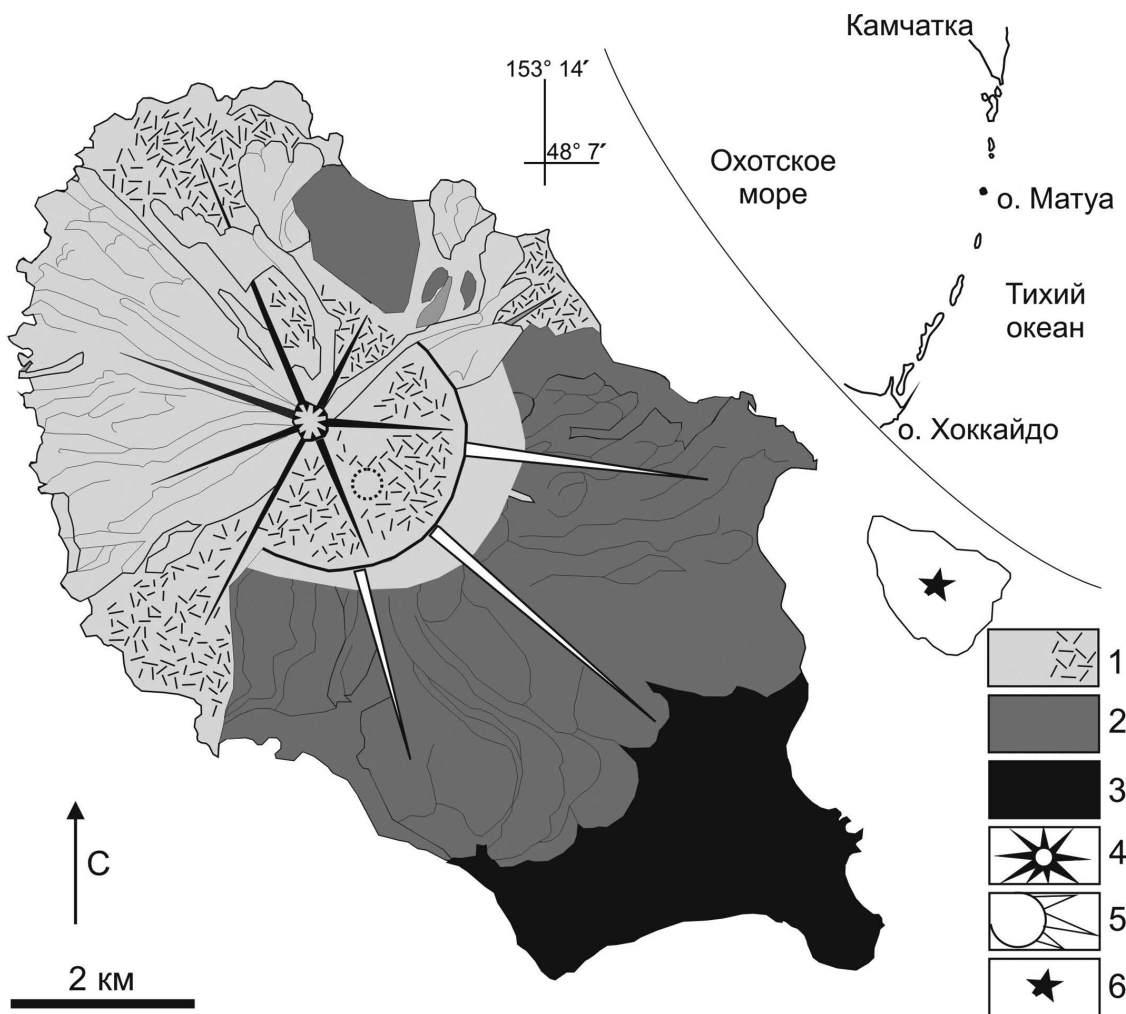


Рис. 1. Геологическая схема о. Матуа, заимствованная из [5], с авторскими правками. 1 — отложения пирокластических потоков, тefры и лавы вулкана Пик Сарычева; 2 — отложения, преимущественно лавы, вулкана Матуа; 3 — фундамент; 4 — позднеголоценовая постройка вулкана Пик Сарычева; 5 — кальдера вулкана Матуа; 6 — о. Топорковый

Fig. 1. Schematic geological map of the Matua Island, taken from [5] with authors remarks. 1 — lava and pyroclastic flow deposits of the Sarychev Peak volcano; 2 — lava deposits of the ancient Matua volcano; 3 — basement rocks; 4 — the Saruchev Peak volcano of Holocene age; 5 — outline of Matua caldera; 6 — Toporkoviy Island

в высоту, а шлейф вулканического пепла протянулся на расстояние до 3 тыс. км. Объем извергнутой пирокластики составил 400 млн м³, объем лавы — 10 млн м³ [2, 10]. Лавовые извержения в эруптивной истории вулкана имеют весьма подчиненное значение. Последние крупные лавовые потоки, достигающие берега моря, относятся к умеренному извержению 1976 г. [2].

Исследовательские работы на территории острова проводились в различные годы. Первые работы по изучению геологического строения вулкана, описанию морфологических характеристик, вещественного состава пород, а также восстановление хронологии вулканических событий проведены А.С. Горшковым, Е.К. Мархининым и другими в 70-х гг. прошлого столетия [3, 8]. Недавние исследования А.В. Рыбина, А.В. Дегтярева и Ю.А. Мартынова внесли значительный вклад в изучение пепловых горизонтов и позволили реконструировать основные этапы эруптивной истории вулкана Пик Сарычева в голоцене [4, 7]. Исследования современной и палеогидротермальной активности в районе вулкана были выполнены сотрудниками ИВиС ДВО РАН в 2017—2018 гг. Главным результатом исследований стали первые находки коренных выходов кварцевых жил, несущих сульфидную минерализацию, полнокристаллических включений амфиболитов [5, 9]. Вместе с тем вопросы изучения химизма и петрологии кислых продуктов вулкана остаются нерешенными. Цель данной работы: реконструировать составы магматических расплавов кальдерообразующего извержения вулкана пра-Матуа на основе изучения химического и минерального состава пемзы.

Геологическое строение вулкана Пик Сарычева

В строении вулкана участвуют остатки постройки, практически полностью разрушенного, предположительно плейстоценового, древнего вулкана Матуа и молодой голоценовый пирокластический конус Пик Сарычева с вершинным кратером диаметром 200—300 м [2, 3, 7]. Сомма сложена преимущественно лавовыми потоками, а центральный конус образован рыхлым пирокластическим материалом.

Остатки вулканической постройки древнего вулкана Матуа, представляющие собой полукальдеру диаметром 3,5—4 км, открытую на запад, отмечаются на южной и восточной стороне острова [3, 4]. Высота соммы составляет 700 м над уровнем моря. Большинство пирокластических отложений древнего вулкана смыто водами в океан. Лавами извержений вулкана пра-Матуа являются

порфиновые неизменные пироксеновые андезиты. Они слагают мыс Ребристый в южной и Ключ в восточной части острова [3, 7].

Юный конус с правильной формой и крутыми склонами (45°) образован за счет многократных извержений рыхлого пирокластического материала, немногочисленных потоков лав и отложений палящих туч, каменных лавин и лахаров. Вершину конуса венчает кратер диаметром примерно 250 м. Значительная часть изверженного вулканического материала была также вынесена в море и переотложена селевыми потоками. Лавовые потоки молодого конуса отличаются более темной окраской от лавы древнего вулкана пра-Матуа и образуют мысы Башня и Лисий на северном и западном берегах острова [1, 3, 7]. По данным Мартынова и др., возраст вулкана Пик Сарычева составляет примерно 500 лет [7].

Пемзово-пирокластические отложения приурочены к кальдере древнего вулкана Матуа. В них отмечаются полнокристаллические оливин-пироксен-анортитовые и пироксен-анортитовые включения [1, 9].

Материалы и методы

Образцы пемзы были отобраны сотрудниками Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН во время проведения полевых геологических работ на острове Матуа совместно с Русским географическим обществом в июле—августе 2018 г. Химический состав пемзы был изучен методом рентгенофлуоресцентного анализа в аналитическом центре ИВиС ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский). Химические составы минералов — вкрапленников породы были изучены на сканирующем электронном микроскопе «Vega III Tescan», оснащенном энергодисперсионным спектрометром «Oxford Instruments X-max 80 mm²» в ИВиС ДВО РАН.

Минералогия

Макроскопически пемза — довольно плотная порфировая порода светло-желтого цвета с характерной волокнисто-поровой текстурой. Поры разнообразной формы и размеров с тонкими стенками-перегородками. По содержанию SiO₂ и суммы щелочей состав пемзы меняется от андезибазальтов (SiO₂ = 55,94 мас.%) до дацитов (SiO₂ = 67,70 мас.%). По содержанию K₂O пемзы относятся к умеренно-калиевой серии пород (рис. 2). Порфиновые вкрапленники составляют порядка 30 % породы. Они представлены плагиоклазами и амфиболами. В данном исследовании пироксены найдены не были. Среди акцессорных минералов

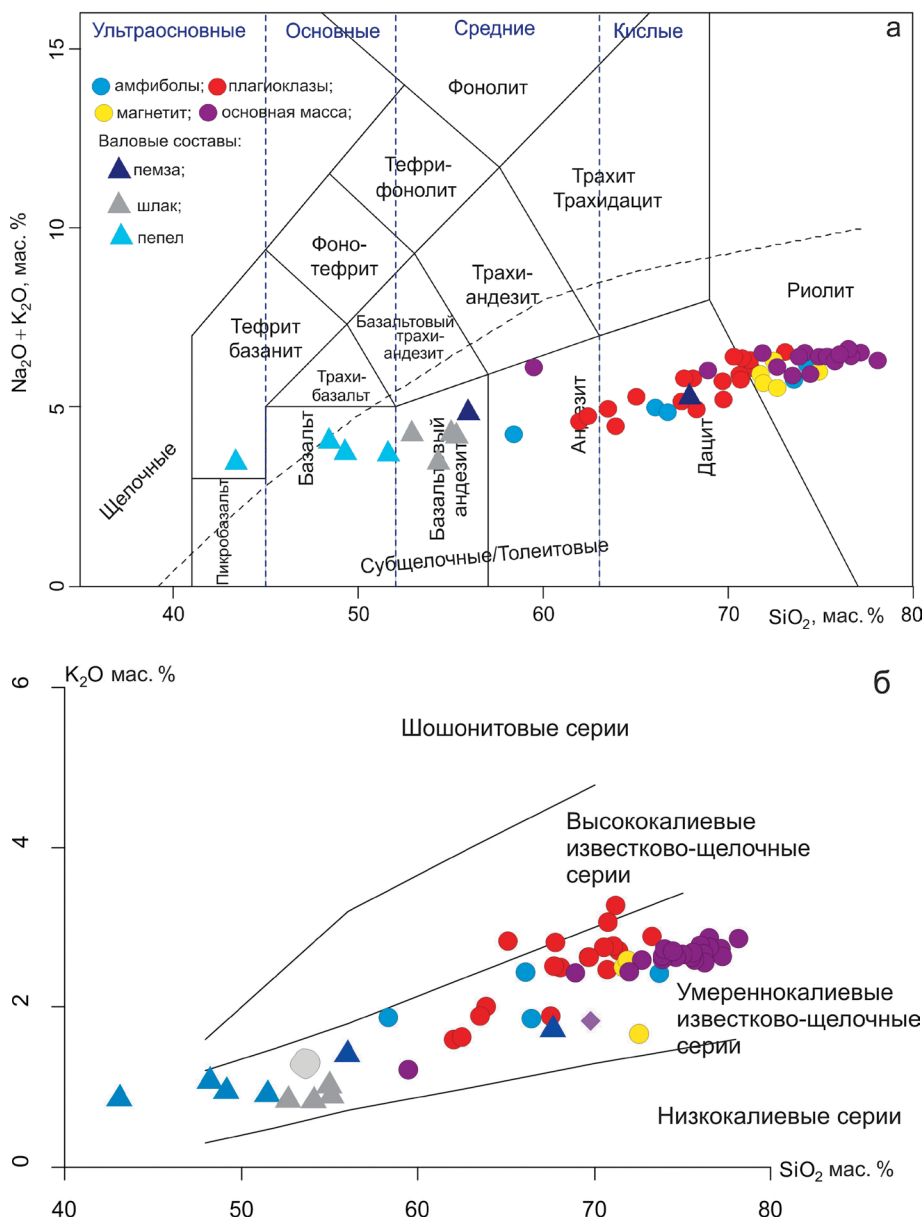


Рис. 2. Классификационные диаграммы, построенные для валовых составов пемзы и расплавных включений в амфиболах, плагиоклазах и магнетитах

Fig. 2. Classification diagrams build for the bulk compositions of pumice and melt inclusions in amphiboles, plagioclases and magnetites

установлены апатит и магнетит. В основной массе присутствуют редкие микролиты плагиоклаза, мелкие зерна Fe-Ti оксидов.

Плагиоклаз представлен крупными широкотаблитчатыми зональными фенокристаллами и незональными субфенокристаллами, хаотично рассеянными в основной массе породы (рис. 3а, б). Отмечаются редкие sdвойникованные кристаллы. Большинство зерен плагиоклаза представлены лабрадором (табл. 1).

Крупные зональные вкрапленники плагиоклаза трещиноваты и интенсивно раздроблены до отдельных агрегатов. При отсутствии признаков резорбции отмечается незначительное оплавление граней кристаллов. Зональность фенокристаллов выражена в резкоконтрастном строении ядерных и краевых зон (рис. 3а). Внутреннее ядро таких плагиоклазов более основное по составу и относится к битовниту An_{71-75} , а внешняя широкая кайма сложена андезин-лабрадором

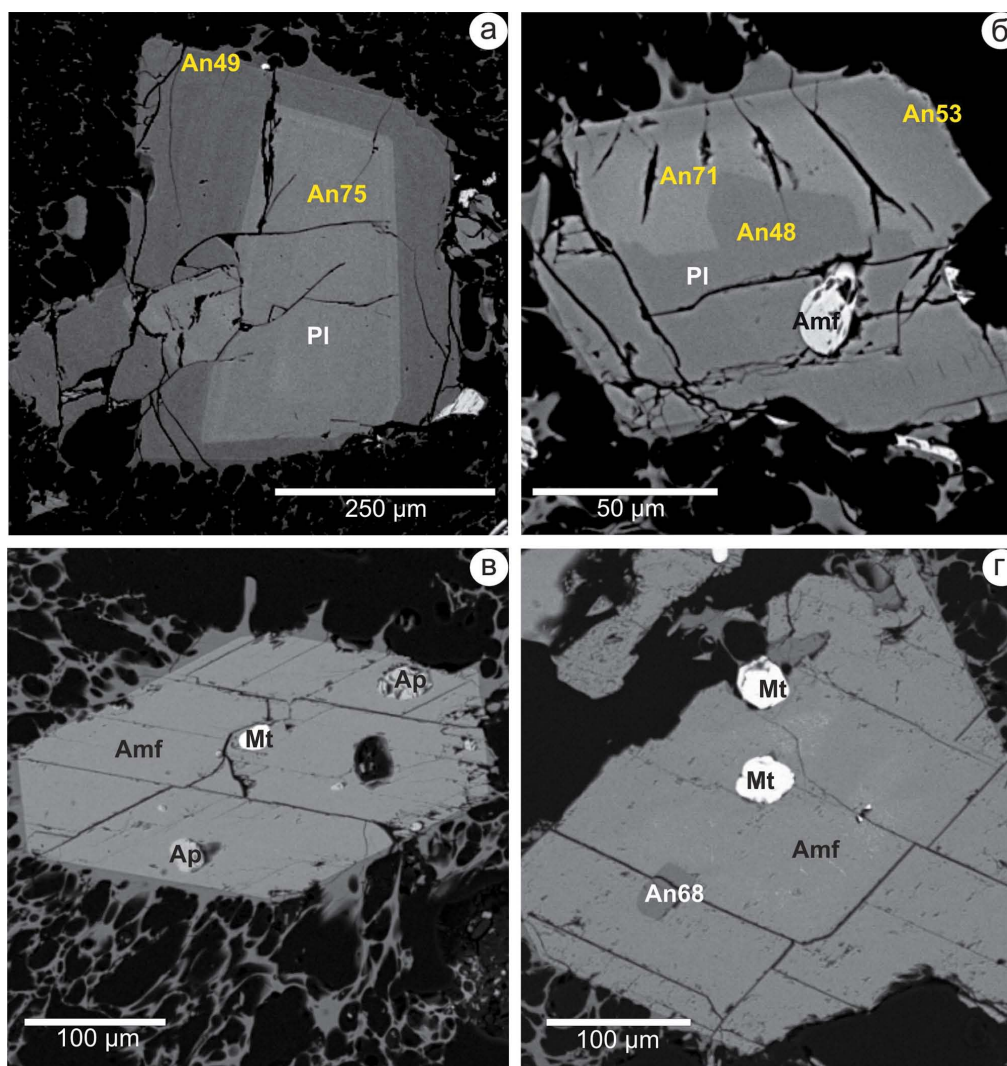


Рис. 3. Минералы — вкрапленники пемзы вулкана Пик Сарычева: а) фенокристалл плагиоклаза с анортитовым внутренним ядром и альбитовой краевой каймой; б) зональный кристалл плагиоклаза с включением амфибола; в) идиоморфный субфенокристалл амфибола с включениями апатита и магнетита; г) вкрапленник амфибола с включением основного плагиоклаза. Фотографии сделаны в режиме обратно рассеянных электронов на сканирующем электронном микроскопе «Vega III Tescan»

Fig. 3. BSE images of the plagioclase and amphibole crystals in pumice samples from the Sarychev Peak volcano: a) normal zoned plagioclase crystal showing outward progression towards more sodic plagioclase; б) normal zoned plagioclase crystal with inclusion of amphibole; в) idiomorphic crystal of amphibole carrying inclusions of apatite and magnetite; г) amphibole phenocryst with inclusions of calcic plagioclase

Ан₄₈₋₅₁. Для некоторых зерен плагиоклаза характерна слабопроявленная осцилляторная зональность, выраженная в незначительном колебании анортитовой молекулы в пределах состава лабрадора Ан₅₉₋₆₅. Кислый плагиоклаз состава Ан₄₈₋₅₁ содержит включения титаномегнетита и амфибола (рис. 3б).

Незональные мезовкрапленники плагиоклаза встречаются гораздо реже. По составу они относятся к лабрадору (Ан₅₁₋₅₃). Некоторые зерна содержат включения стекла и Fe-Ti оксидов.

Роговая обманка — единственный темноцветный минерал, диагностированный в настоящем исследовании. Встречается в виде незональных идиоморфных удлиненно-призматических и ромбических фено- и субфенокристаллов, зачастую сильно раздробленных (рис. 3в, г). В шлифе имеет густо-зеленую окраску и отчетливый плеохроизм. Амфибол содержит множество кристаллических включений плагиоклаза, магнетита и апатита (рис. 3в, г). Включения расплава отмечаются гораздо реже и часто раскристаллизованы.

Таблица 1. Состав плагиоклазов из пемз вулкана Пик Сарычева
Table 1. Selected EPMA data of plagioclase crystals from pumice of the Sarychev Peak volcano

| | 1 ц | 2 кр | 3 ц | 4 кр | 5 ц | 6 кр | 7* | 8* | 9* |
|--------------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|
| SiO ₂ | 56,14 | 56,19 | 47,72 | 55,13 | 55,67 | 47,85 | 52,62 | 50,44 | 50,63 |
| Al ₂ O ₃ | 27,83 | 28,10 | 32,28 | 28,52 | 27,97 | 32,29 | 29,04 | 31,36 | 30,98 |
| FeO | 0,40 | 0,29 | 0,29 | - | - | 0,65 | 0,55 | 0,59 | 0,64 |
| CaO | 10,47 | 10,79 | 15,86 | 10,99 | 10,59 | 15,72 | 12,23 | 14,61 | 14,10 |
| Na ₂ O | 5,36 | 5,23 | 2,36 | 5,09 | 5,69 | 2,77 | 4,49 | 3,28 | 3,46 |
| K ₂ O | 0,17 | 0,18 | - | 0,21 | 0,24 | - | - | - | 0,16 |
| Сумма | 100,37 | 100,78 | 98,51 | 99,94 | 100,16 | 99,28 | 98,93 | 100,28 | 99,97 |
| An | 51 | 53 | 79 | 54 | 50 | 76 | 60 | 71 | 69 |
| Ab | 48 | 46 | 21 | 45 | 49 | 24 | 40 | 29 | 30 |
| Or | 0,1 | 0,1 | 0 | 0,1 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0,1 |

Примечание: ц — центр зерна плагиоклаза; кр — край зерна плагиоклаза; * включение плагиоклаза в амфиболе.

Note: ц — core of the plagioclase crystal; кр — rim of the plagioclase crystal; * plagioclase inclusion in amphibole.

Таблица 2. Состав амфиболов из пемз вулкана Пик Сарычева
Table 2. Selected EPMA data of amphibole crystals from pumice of the Sarychev Peak volcano

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8* |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SiO ₂ | 46,38 | 48,69 | 43,85 | 42,66 | 40,86 | 40,88 | 47,30 | 47,53 |
| TiO ₂ | 1,32 | 1,13 | 1,58 | 2,12 | 2,00 | 2,10 | 0,93 | 1,05 |
| Al ₂ O ₃ | 8,35 | 7,49 | 11,52 | 11,99 | 11,64 | 13,31 | 8,48 | 7,40 |
| FeO | 13,82 | 13,70 | 14,83 | 14,56 | 18,07 | 15,65 | 13,75 | 13,01 |
| MnO | 0,69 | 0,93 | 0,62 | 0,57 | 0,62 | 0,48 | 0,84 | 0,85 |
| MgO | 14,48 | 15,19 | 12,90 | 13,26 | 12,85 | 12,37 | 15,55 | 15,57 |
| CaO | 10,64 | 10,76 | 11,03 | 11,30 | 11,03 | 11,76 | 10,27 | 10,60 |
| Na ₂ O | 1,23 | 1,20 | 1,64 | 1,82 | 1,76 | 2,11 | 1,29 | 1,16 |
| K ₂ O | 0,26 | 0,26 | 0,43 | 0,39 | 0,38 | 0,38 | 0,29 | 0,23 |
| Сумма | 97,17 | 99,35 | 98,4 | 98,67 | 99,21 | 99,04 | 98,7 | 97,4 |

Примечание: * включение амфибола в плагиоклазе.

Note: * amphibole inclusion in plagioclase.

Результаты микрозондового изучения состава амфиболов показаны в таблице 2. В соответствии с классификацией по [14] все исследованные амфиболы относятся к магнезиальной роговой обманке и чермакиту. Значения $(Ca+Na)^B > 1$, Si 5,9—6,9, $(Na+K)^A$ — 0,2—0,5, $Mg\#$ — 0,6—0,9 и Al^{IV} 1—2. Значительных изменений в составе центральных и краевых частей кристаллов не обнаружено. В некоторых кристаллах выявлено незначительное понижение содержания Al_2O_3 от центра (11 мас.%) к краю (8 мас.%) при столь же незначительном возрастании значений MgO . В целом содержания выдержаны в пределах зерен и колеблются в пределах 1—2 мас.%. Включения плагиоклаза в амфиболе представлены лабрадором — An_{68} (рис. 3г).

Апатит встречается в виде включений в минералах-вкрапленниках, преимущественно в амфиболе и титаномagnetите. Размеры включений апатита меняются от едва различимых округлой формы вкраплений до крупных (50 мн) удлинённых образований с хорошо выраженными кристаллографическими очертаниями (рис. 3в). По химическому составу атипатитовые включения относятся к хлорапатитам с незначительной примесью серы (табл. 3). На фоне повышенных содержаний хлора (0,45—2,19 мас.%) концентрации фтора и серы составляют 0—1,99 и 0,19—1,36 мас.%,

Таблица 3. Состав включений апатита во вкрапленниках пемз вулкана Пик Сарычева
Table 3. Selected EPMA data of apatite inclusions in phenocrysts from pumice of the Sarychev Peak volcano

| | Amph | Amph | Pl | Pl | Mgt | Mgt |
|-------------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|
| SiO ₂ | - | - | 0,47 | 0,40 | 0,60 | |
| TiO ₂ | - | - | - | - | - | |
| FeO | 0,58 | 0,72 | 0,39 | 0,39 | 2,29 | 1,24 |
| MnO | 0,29 | - | - | 0,40 | 0,31 | |
| CaO | 53,79 | 53,99 | 53,97 | 53,69 | 52,92 | 53,91 |
| P ₂ O ₅ | 42,80 | 43,33 | 40,98 | 41,22 | 40,72 | 40,91 |
| SO ₃ | - | - | 0,47 | - | 1,36 | 0,92 |
| Cl | 2,05 | 2,08 | 1,99 | 1,99 | 2,19 | 1,91 |
| F | 1,23 | - | 0,96 | 1,13 | 1,49 | |
| Сумма | 100,74 | 100,12 | 99,23 | 99,21 | 101,89 | 99,71 |

соответственно (табл. 3). В крупных апатитовых включениях наблюдается некоторое понижение концентраций фтора и хлора от центра к периферии зерна.

Fe-Ti оксиды представлены по степени распространенности титаномагнетитом, магнетитом и ильменитом. Они встречаются в виде крупных самостоятельных ксеноморфных зерен, включений в минералах-вкрапленниках, а также в сростаниях с ними. В качестве включений Fe-Ti оксиды содержат мелкие вкрапления Fe-Cu сульфидов, цирконов и достаточно крупные кристаллы апатита с четкими кристаллографическими очертаниями. По результатам микрозондового анализа примеси TiO₂ составляют 3—5 мас.%. Также характерны примеси, V, Mn и Mg. Структуры распада твердых растворов в Fe-Ti оксидах не были установлены.

Расплавные и флюидные включения

Расплавные и флюидные включения были найдены главным образом в кристаллах плагиоклаза. Расплавные включения в плагиоклазе, состоящие из стекла и усадочного пузырька при комнатной температуре, располагаются преимущественно в ядерных зонах кристаллов и по зонам роста. Частично раскристаллизованные расплавные включения найдены в амфиболах. На диаграмме зависимости кремнекислоты от суммы щелочей состава расплавных включений образуют вытянутое поле от андезитового до риолитового состава (рис. 2а). При этом большинство фигуративных точек укладывается в поле риолитов, относящихся к включениям стекла в магнетитах и основной массе породы. Стекловатые включения в плагиоклазах отличаются наиболее

широкими вариациями состава от андезитов до риолитов (рис. 2а). По соотношению Na₂O—K₂O стекла относятся к умеренно-калиевой известково-щелочной серии (рис. 2б).

Обсуждение результатов

Пемзы вулкана Пик Сарычева предположительно связывают с образованием вершинной кальдеры вулкана пра-Матуа [1]. По набору минералов-вкрапленников, установленных в настоящем исследовании, и их химического состава пемза вулкана Пик Сарычева сопоставима с пемзой залива Львиная Пасть [11].

Все минералы-вкрапленники в пемзе вулкана Пик Сарычева пространственно разобщены и представлены плагиоклазом, роговой обманкой и магнетитом. Апатит отмечается исключительно в виде включений в других минералах. Основная масса сложена преимущественно стекловатым базисом, что можно рассматривать как отсутствие кристаллизации при подъеме расплава в жерле вулкана. Кислый плагиоклаз An₄₈₋₅₁ содержит включения амфибола (рис. 3б). Вкрапленники и включения амфибола сопоставимы по составу и относятся к магнезиальной роговой обманке и чермакиту (рис. 4). Включения основного плагиоклаза An₆₈ отмечаются в самостоятельных зернах амфибола (рис. 3г). Согласно наблюдающимся структурным взаимоотношениям минералов в пемзах вулкана Пик Сарычева можно сделать заключение о близодновременной кристаллизации плагиоклаза, амфибола, магнетита и апатита.

Вкрапленники амфиболов пемзы Пик Сарычева отличаются широкими вариациями содержания глинозема (7—13 мас.%), постоянством химического состава и отсутствием внутренней

Таблица 4. Состав включений стекла во вкрапленниках и основной массе пемзы вулкана Пик Сарычева
Table 4. Selected EPMA data of glass inclusions in phenocrysts and ground mass from pumice of the Sarychev Peak volcano

| Минерал хозяин | Amph | Amph | Pl | Pl | Mgt | Mgt | Осн. масса | Осн. масса |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|------------|
| SiO ₂ | 74,43 | 73,56 | 70,66 | 73,22 | 72,47 | 74,7 | 74,72 | 76,07 |
| TiO ₂ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,29 | 0,23 | 0 | 0 |
| Al ₂ O ₃ | 12,74 | 12,32 | 13,91 | 12,43 | 12,30 | 12,94 | 13,48 | 12,23 |
| FeO | 1,28 | 1,30 | 1,16 | 1,07 | 1,39 | 1,53 | 1,07 | 1,46 |
| MgO | 0 | 0,23 | 0 | 0,35 | 0,31 | 0,24 | 0,25 | 0,31 |
| CaO | 1,74 | 1,68 | 3 | 1,74 | 1,68 | 1,67 | 2,13 | 1,82 |
| Na ₂ O | 3,48 | 3,25 | 3,39 | 3,57 | 3,70 | 3,38 | 3,64 | 3,71 |
| K ₂ O | 2,61 | 2,46 | 2,47 | 2,86 | 2,57 | 2,57 | 2,63 | 2,71 |
| Сумма | 96,28 | 94,80 | 94,59 | 95,24 | 94,71 | 97,26 | 97,92 | 98,31 |

зональности (табл. 2, рис. 3в, г). Постоянство химического состава амфиболов может свидетельствовать о неизменных параметрах температуры и давления магматического расплава. Абсолютное преобладание амфибола среди темноцветных минералов указывает на высокое содержание воды в расплаве (примерно 4—5 мас.%) и значительную степень эволюционирования магматической системы [7]. Большинство изученных зерен амфиболов показали содержание глинозема в пределах 7—8 мас.%, что согласно экспериментальным расчетам [13] соответствует давлению 1,5—2,2 кбар [6].

Плаггиоклаз в отличие от амфибола характеризуется наличием ярко выраженной зональности и меньшим наличием кристаллических включений. При незначительных колебаниях концентраций железа анортитовая составляющая меняется от An₇₅ до An₄₉, что отражает общую эволюцию понижения температуры в очаге и начало кристаллизации амфибола.

Включения расплава пемзы вулкана Пик Сарычева обогащены относительно включений расплава вулкана Лъвиная Пасть и прешейка Ветровой содержанием щелочей

и обеднены алюминием (рис. 2а). Большинство исследуемых расплавных включений являются риолитовыми по составу и отражают основной состав магмы перед извержением. Согласно данным микрозондового анализа включения стекла не содержат примесей серы. Постоянная примесь серы установлена в апатитах в количестве 0,44—0,92 мас.% (табл. 4). Присутствие SO₃ в магматическом расплаве подтверждается и наличием включений сульфидов в магнетите. Ассоциации флюидных и расплавных включений в кристаллах плаггиоклазов указывают на процессы дегазации, происходившие в магматическом очаге перед извержением.

Заключение

Андезито-дацитовая пемза вулкана Пик Сарычева относится к типичным островодужным образованиям известково-щелочной серии пород. По своим текстурно-структурным и геохимическим характеристикам близка к пемзе вулкана Лъвиная Пасть, о. Итуруп. Минералы — вкрапленники пемзы кристаллизовались практически одновременно из водонасыщенного магматического расплава (4—5 мас.%) при давлении 1,5—2,2 кбар.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В.Н., Шанцер А.Н., Хренов А.П., Округин В.М., Нечаев В.Н. Извержение вулкана Пик Сарычева в 1976 г. // Бюллетень вулканологических станций. 1978. № 55. С. 35—40.
2. Гришин С.Ю., Мелекесцев И.В. Лавовые потоки (извержение 2009 г.) вулкана Пик Сарычева (Центральные Курилы) // Вестник Краунц. Науки о Земле. 2010. Вып. 15. № 1. С. 232—239.
3. Горшков Г.С. Вулкан Пик Сарычева // Бюллетень вулканологической станции. 1948. № 15. С. 3—7.
4. Дегтерев А.В., Рыбин А.В., Мелекесцев И.В., Разжигаяева Н.Г. Эксплозивные извержения вулкана Пик Сарычева в голоцене (о. Матуа, Центральные Курилы): геохимия тефры // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 6. С. 16—26.

5. Витер И.В., Верещага Е.М., Округин В.М., Кудяева Ш.С., Плутахина Е.Ю., Зобенько О.А. О вулканогенной рудной минерализации о. Матуа (Курильские острова) // Материалы XXI Всероссийской научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2018. С. 165—168.
6. Леонов В.Л., Гриб Е.Н. Структурные позиции и вулканизм четвертичных кальдер Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 2004. 189 с.
7. Мартынов Ю.А., Рыбин А.В., Дегтерев А.В., Остапенко Д.С., Мартынов А.Ю. Геохимическая эволюция вулканизма о. Матуа (Центральные Курилы) // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 34. № 1. С. 13—33.
8. Мархинин Е.К. Вулкан Сарычева // Бюллетень вулканологической станции. 1964. № 35. С. 44—58.
9. Округин В.М., Скильская Е.Д., Кудяева Ш.С., Плутахина Е.Ю., Философова Т.М. Включения гранитоидов в эффузивно-пирокластических породах вулкана Пик Сарычева, о. Матуа, Центральные Курилы // Материалы XXIII конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 49—51.
10. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В., Гурьянов В.Б. Вулканическая активность на Курильских островах в XXI в. // Вестник ДВО РАН. 2017. № 1. С. 51—61.
11. Смирнов С.З., Рыбин А.В., Соколова Е.Н., Кузьмин Д.В., Дегтерев А.В., Тимина Т.В. Кислые магмы кальдерных извержений острова Итуруп: первые результаты исследования расплавных включений во вкрапленниках пемз кальдеры Львиная пасть и перешейка Ветровой // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36. № 1. С. 52—69.
12. Эрлих Э.Н., Мелекесцев И.В. Четвертичный кислый вулканизм западной части Тихоокеанского кольца // Кислый вулканизм / Под ред. К.Н. Рудич. Новосибирск: Наука, 1973. С. 4—39.
13. Jonson M.C., Rutherford M. Experimental calibration of the aluminum in hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks // Geology. 1989. V. 17. No. 9. P. 837—841.
14. Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S., et al. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on amphiboles of the Mineralogical association // Mineralogical Magazine. 1997. Vol. 61. No. 3. P. 295—321.

REFERENCES

1. Andreev V.N., Shancer A.N., Khrenov A.P., Okrugin V.M., Nechaev V.N. Eruption of Peak Sarychevo volcano in 1976 // Volcanol. Stations Bulletin. 1978. No. 55. P. 35—40 (In Russian).
2. Grishin S.Yu., Melekestsev I.V. Lava flows at the Peak Sarychevo volcano (Central Kurile) Vestnik Kraunc // Earth Science. 2010. Vol. 15. No. 1. P. 232—239 (In Russian).
3. Gorshkov G.S. The Peak Sarychevo volcano // Volcanol. Stations Bulletin. 1948. No. 15. P. 3—7 (In Russian).
4. Degterev A.V., Rybin A.V., Melekestsev I.V., Razzhigayeva N.G. Explosive eruptions of the Sarychev Peak volcano in the Holocene on Matua island, the Central Kuriles: the tephra geochemistry // Rus. J. Pacific Geol. 2012. Vol. 31. No. 6. P. 16—26.
5. Viter I.V., Vereshchaga E.M., Okrugin V.M., Kudaeva Sh.S., Plutakhina E.Yu., Zobenko O.A. About volcanic ore mineralization at the Matua Island (Kurile Islands) // Extended abstracts of the XXIII conference “Volcanism and related processes”. Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS, 2018. P. 165—168 (In Russian).
6. Leonov V.L., Grib E.N. Structural positions and caldera eruptions of Quaternary volcanoes in Kamchatka. Vladivostok: Dalnauka, 2004. 189 p. (In Russian).
7. Martynov Yu.A., Rybin A.V., Degterev A.V., Ostapenko D.S., Martynov A.Yu. Geochemical evolution of volcanism of the Matua island (Central Kuril islands) // Rus. J. Pacific Geol. 2015. Vol. 34. No. 1. P. 13—33 (In Russian).
8. Markchinin E.K. The Sarychevo volcano // Volcanol. Stations Bulletin. 1964. No. 35. P. 44—58 (In Russian).
9. Okrugin V.M., Skilskaya E.D., Kudaeva Sh.S., Plutakhina Ye.Yu., Philosophova T.M. Inclusions of granitoids in effusive-pyroclastic rocks of the Sarychev Peak volcano, Matua Island, Central Kuriles // Extended abstracts of the XXIII conference “Volcanism and related processes”. Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS, 2020. P. 49—51.
10. Rybin A.V., Chibisova M.V., Degterev A.V., Guryanov V.B. Volcanic activity at Kurile Islands // Vestnik DVO RAS. 2017. No. 1. P. 51—61.
11. Smirnov S.Z., Rybin A.V., Sokolova E.N., Kuzmin D.V., Degterev A.V., Timina T.V. Felsic magmas of the caldera-forming eruptions on the Iturup Island: the first results of studies of the melt inclusions in phenocrysts from pumices of the Lvinaya Past and Vetrovoy Issthmus calderas // Rus. J. Pacific Geol. 2017. Vol. 11. No. 1. P. 52—69.
12. Erlich E.N., Melekestsev I.V. Quaternary acid volcanism in western area of the Pacific rim. Acid volcanism. Eds. K.N. Rudich. Novosibirsk: Nauka, 1973. P. 4—39 (In Russian).
13. Jonson M.C., Rutherford M. Experimental calibration of the aluminum in hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks // Geology. 1989. V. 17. No. 9. P. 837—841.
14. Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S., et al. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on amphiboles of the Mineralogical association // Mineral. Magazine. 1997. Vol. 61. No. 3. P. 295—321.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Округин В.М. — определил цели, задачи и методы исследования, провел полевые работы с отбором каменного материала. Утвердил окончательный текст статьи. Согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Скильская Е.Д. — обработала каменный материал и подготовила для выполнения детальных минералого-геохимических исследований, провела интерпретацию результатов физико-химических анализов, подготовила текст статьи и графический материал. Согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Москалева С.В. — выполнила электронно-микроскопические исследования пемзового материала вулкана Пик Сарычева, о. Матуа. Согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Victor M. Okrugin — stated the aim of the research, methods, and managed a field works with collecting pumice samples. Approved the manuscript. Okrugin V.M and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Elena D. Skilskaya — carried out the mineralogical and geochemical studies, wrote the paper, prepared the illustrations and tables for the paper, interpreted results of the EPMA and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Svetlana V. Moskaleva — performed electron microscopic studies of the pumices from the Sarychev Peak volcano and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Округин Виктор Михайлович — кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией вулканогенного рудообразования Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

9, Бульвар Пийпа, г. Петропавловск-Камчатский 683006, Россия

E-mail: okrugin74@gmail.com

SPIN-код: 7131-5358

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7038-2970>

Victor M. Okrugin — Cand. Sci. (Geol.-Min.), head of the laboratory the volcanic ore genesis, Institute of volcanology and seismology of FEB RAS.

9, Boulevard Piip, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia

E-mail: okrugin74@gmail.com

SPIN-code: 7131-5358

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7038-2970>

Скильская Елена Демьяновна* — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории вулканогенного рудообразования Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

9, Бульвар Пийпа, г. Петропавловск-Камчатский 683006, Россия

e-mail: wideworldscience@gmail.com

SPIN-код: 1277-9244

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3506-4181>

Elena D. Skilskaya* — Cand. Sci. (Geol.-Min.), senior researcher, the volcanic ore genesis laboratory, Institute of volcanology and seismology of FEB RAS.

9, Boulevard Piip, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia

e-mail: wideworldscience@gmail.com

SPIN-code: 1277-9244

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3506-4181>

Москалева Светлана Васильевна — научный сотрудник лаборатории вулканогенного рудообразования Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

9, Бульвар Пийпа, г. Петропавловск-Камчатский 683006, Россия

E-mail: zond@kscnet.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1508-5599>

Svetlana V. Moskaleva — researcher, the volcanic ore genesis laboratory, Institute of volcanology and seismology of FEB RAS.

9, Boulevard Piip, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia

E-mail: zond@kscnet.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1508-5599>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author