

**Первые изотопно-геохимические (Sr-Nd-Pb) данные о лавах вершинного и побочного извержений вулкана Ключевской в 2020-2021 гг.**

**Черкашин Р.И.<sup>1</sup>, Бергаль-Кувикас О.В.<sup>1,2</sup>, Чугаев А.В.<sup>2</sup>, Ларионова Ю.О.<sup>2</sup>, Хомчановский А.Л.<sup>1</sup>**

**First geochemical and isotope (Sr-Nd-Pb) data on the lavas of 2020-2021 summit and flank eruptions of the Klyuchevskoy volcano**

**Cherkashin R.I.<sup>1</sup>, Bergal-Kuvikas O.V.<sup>1,2</sup>, Chugaev A.V.<sup>2</sup>, Larionova Yu.O.<sup>2</sup>, Homchanovsky A.L.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский; e-mail: romache@kscnet.ru*

<sup>2</sup> *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва*

В работе представлены новые изотопно-геохимические данные для лав двух последних вершинного и побочного извержений вулкана Ключевской в 2020-2021 гг. По данным общей химии, лавы обоих извержений формируют единый тренд, от более мафических разностей побочного прорыва к более дифференцированным лавам вершинных извержений. Геохимия редких элементов и изотопных систем предполагает высокую степень коровой ассимиляции в лавах прорыва им. Г.С. Горшкова.

### **Введение**

Проблема формирования базальтовых и андезибазальтовых стратовулканов с обширными проявлениями побочного вулканизма представляет большой интерес для понимания процессов миграции магмы и ее эволюции на пути к земной поверхности. На таких вулканах, как Этна, Питон-де-ла-Фурнез, Гекла, Килауэа, Сакурадзима, Фуджи, так же, как и на вулкане Ключевской, наблюдаются чередующиеся циклы вершинных и побочных извержений. Ряд работ затрагивает причины таких циклов и особенности магматических питающих систем, которые приводят к побочным извержениям [7 и ссылки в ней]. В настоящий момент не существует общепринятой модели того, как работают такие вулканы. У каждого конкретного вулкана и его питающей системы есть свои характерные черты, обусловленные геотектоническими условиями его формирования и их эволюцией, а также геологическим строением территории.

Самый высокий в Евразии голоценовый вулкан Ключевской расположен в надсубдукционной обстановке, в пределах Центрально-Камчатской депрессии (ЦКД). Согласно одним представлениям, его магмоподводящая система имеет единый питающий канал без крупных промежуточных магматических очагов, что обеспечивает быстрый подъем магм с глубинных (мантийных) уровней к поверхности [1]. Напротив, другие исследователи предполагают существование одного или двух относительно крупных промежуточных магматических очагов [4, 5]. Независимо от существующих точек зрения, следует признать, что вершинные и побочные извержения вулкана взаимосвязаны общей питающей системой. Соответственно, магмы для этих двух типов извержений могут иметь общие источники. В представленном докладе рассмотрено состояние питающей системы Ключевского вулкана к 2020-2021 гг. и дана изотопно-геохимическая (Sr-Nd-Pb) характеристика источников магматических расплавов последних вершинных и побочного извержений.

18 февраля 2021 г. на вулкане Ключевской произошло уникальное событие: после долгого периода (более 30 лет) доминирования вершинных извержений, на северо-западном склоне вулкана на высоте 2850 м образовался побочный прорыв, названный в честь члена-корреспондента АН СССР Г.С. Горшкова [2] (рис. 1). За 10 дней до открытия прорыва окончилось извержение вершинного кратера, продолжавшееся с сентября 2020 г. Столь краткий временной перерыв между этими двумя событиями позволяет проследить тесную генетическую взаимосвязь продуктов

извержений разных лет и выявить для них сходство или различие в источниках магм. Кроме того, это дает возможность оценить эволюцию магматической питающей системы вулкана Ключевской со времени последней активизации побочных прорывов в конце 1980-х гг.

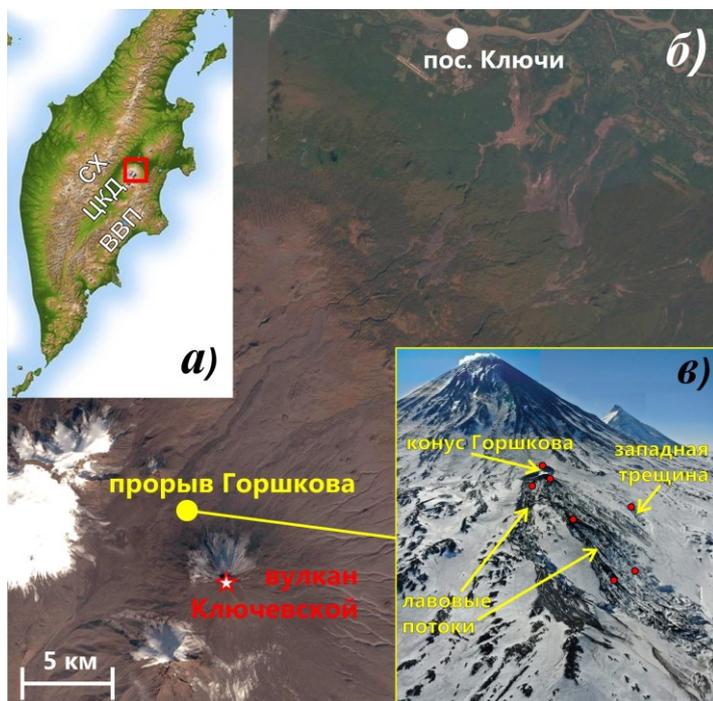


Рис. 1. а) положение вулкана Ключевской на карте Камчатки, ВВП – Восточный вулканический пояс, ЦКД – Центральная камчатская депрессия, СХ – Срединный хребет; б) спутниковый снимок области в красной рамке из врезки а) с расположением вулкана Ключевской и прорыва им. Г.С. Горшкова; в) снимок прорыва им. Г.С. Горшкова 5.04.2021 г. (вид на юг, на заднем плане – вулкан Камень), красные точки – места отбора проб.

### Материалы и методы исследования

В качестве материала исследований были отобраны образцы различных участков лавовых потоков побочного прорыва им. Г.С. Горшкова (2021 г.), а также образцы вершинных извержений вулкана Ключевской 2020-2021 гг. и 2016 г. Все работы по вещественному химическому анализу проводились в Аналитическом центре и Лаборатории изотопной геохимии Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва. Основные элементы определялись рентгенофлуоресцентным анализом (XRF), состав микроэлементов – методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS), изотопные данные были получены высокоточными масс-спектрометрическими методами.

### Результаты и обсуждение

Андезибазальты двух рассматриваемых извержений Ключевского вулкана с точки зрения петрографии имеют очень схожий облик: мелкопорфировая структура, гиалопилитовая основная масса, высокая степень пористости. Вкрапленники представлены плагиоклазом в нескольких генерациях, а также, в подчиненном количестве, оливином и клинопироксеном. Для лавы вершинного извержения степень пористости выше: объем пор до 50 %, в сравнении с ~20-30 % для лав побочного прорыва. В то же время, стекло в основной массе в лавах вершинного кратера раскристаллизовано чуть лучше. Количество вкрапленников, главным образом, плагиоклаза в лавах прорыва им. Г.С. Горшкова достигает 40 %, против 25 % вкрапленников в лавах вершинного извержения. Повышенная пористость лав вершинного извержения указывает на более интенсивную дегазацию магм в процессе их подъема к поверхности, а следы роста микролитов в основной массе говорят о более длительной эволюции расплава по сравнению с лавами побочного прорыва.

На диаграммах Харкера (рис. 2) представлены составы лав прорыва им. Г.С. Горшкова, лавы вершинного извержения Ключевского вулкана 2020-2021 гг., а также составы лав вершинных извержений 2016 и 1945 гг., на фоне данных об

исторических побочных и вершинных извержениях. Составы лав вершинных извержений Ключевского вулкана 2016 и 2020-2021 гг. находятся в общем поле его вершинных исторических извержений и по составу очень близки друг к другу. Лавы прорыва им. Г.С. Горшкова имеют заметный разброс в содержании  $\text{SiO}_2$  – от 51.6 до 53.2 масс. %.

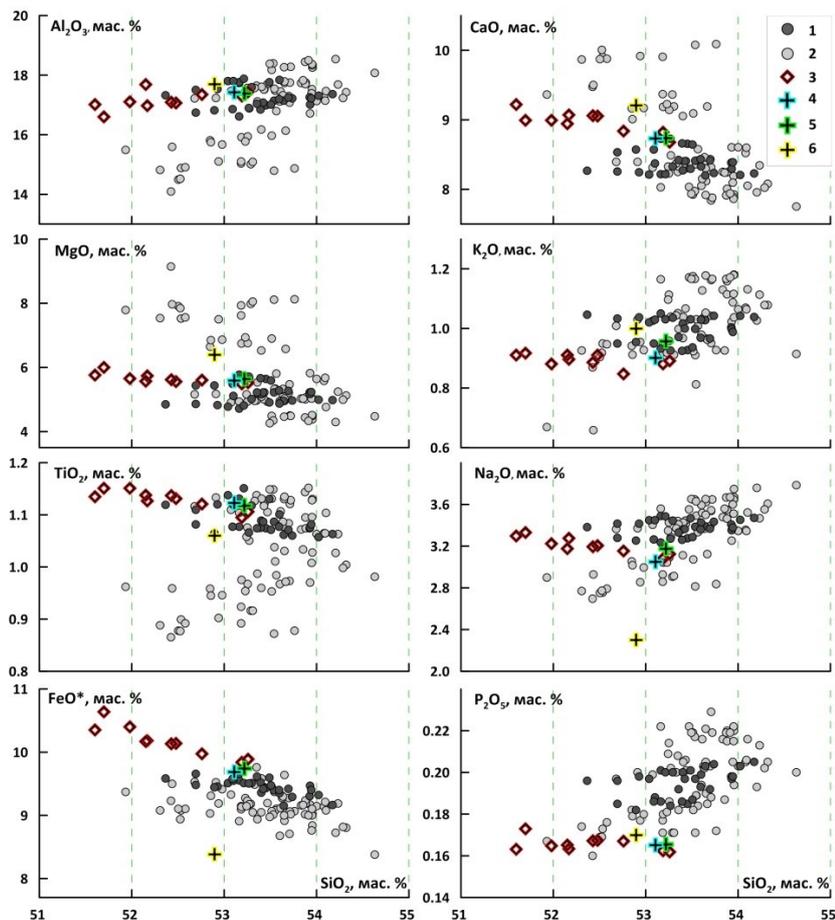


Рис. 2. Диаграммы Харкера для лав извержений вулкана Ключевской:

- 1 – вершинные исторические извержения [6];
- 2 – побочные исторические извержения [6];
- 3 – прорыв им. Г.С. Горшкова; отдельные вершинные извержения;
- 4 – 2020-2021 гг.;
- 5 – 2016 г.;
- 6 – 1945 г. [3].

Крайние члены лав прорыва с наибольшим содержанием  $\text{SiO}_2$  по составу четко совпадают с лавами последних вершинных извержений Ключевского вулкана. Остальные точки составов лав прорыва выстраиваются в тренд, в котором с понижением  $\text{SiO}_2$  повышается содержание  $\text{FeO}$ , слегка повышается  $\text{CaO}$  и падает  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , составы других окислов почти не меняются. Содержания  $\text{MgO}$  в лавах всех обсуждаемых извержений практически постоянны (5.5-6 масс. %).

Наблюдаемый линейный тренд, на который ложатся точки составов лав последних вершинных извержений Ключевского вулкана и лавы прорыва им. Г.С. Горшкова, свидетельствует о едином источнике магм этих извержений. При этом верхняя часть тренда образована точками лав вершинных извержений. Из этого можно заключить, что магматические расплавы вершинных извержений претерпели более длительную эволюцию, которая сопровождалась кристаллизационной дифференциацией в процессе их подъема к поверхности.

На рис. 3 представлены корреляционные диаграммы для изотопных отношений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ . На диаграмме в координатах  $\text{MgO} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  точки лав прорыва им. Г.С. Горшкова образуют непрерывный тренд, ориентированный перпендикулярно полю исторических побочных прорывов. Диаграмма  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  к  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  показывает высокие соотношения изотопов свинца, ранее не наблюдавшиеся в лавах Ключевского вулкана. Это позволяет предположить высокий уровень ассимиляции корового вещества как в лавах прорыва им. Г.С. Горшкова, так и для последних вершинных извержений. Диаграмма  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  к  $\text{SiO}_2$  наглядно

демонстрирует разнонаправленные тренды лав прорыва им. Г.С. Горшкова и всех предшествующих побочных извержений на Ключевском вулкане.

Отмеченные геохимические особенности лав последних извержений дают основание предполагать изменение (эволюцию) магматической системы Ключевского вулкана после долгого перерыва в деятельности боковых прорывов, а также возрастание интенсивности процессов коровой ассимиляции.

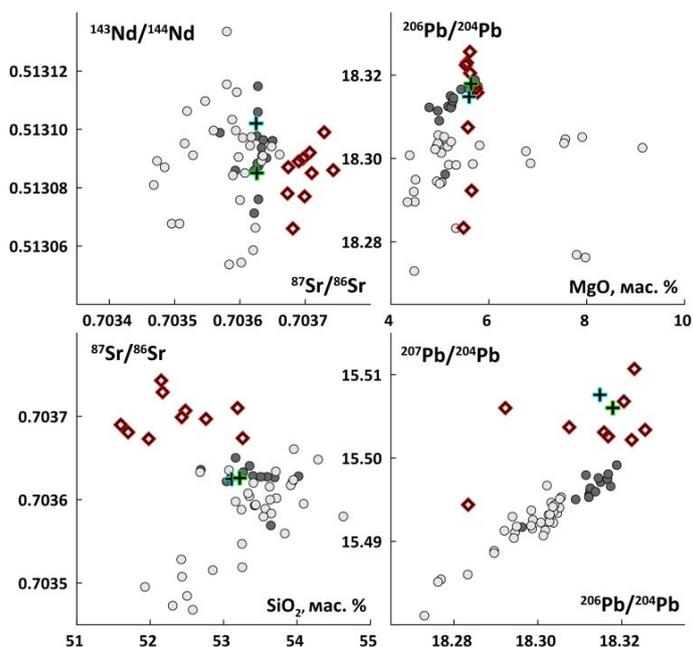


Рис. 3. Корреляционные диаграммы для изотопных отношений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и содержаний MgO и SiO<sub>2</sub> для лав вулкана Ключевской (условные обозначения: см. рис. 2).

### Заключение

Петрографические, геохимические и изотопные Sr-Nd-Pb данные, представленные в работе, свидетельствуют о тесной взаимосвязи лав последних вершинных и побочного извержений вулкана Ключевской. Лавы вершинных извержений более дифференцированы и отражают более длительный процесс эволюции магмы по мере ее подъема к поверхности по сравнению с лавами побочного прорыва им. Г.С. Горшкова. В свою очередь, изотопно-геохимические данные указывают на высокую степень ассимиляции коровых пород, не наблюдавшуюся ранее для лав побочных извержений, что свидетельствует о ярком изменении в магмоподводящей системе Ключевского вулкана со времени последней активизации побочных прорывов в конце 1980-х гг.

### Список литературы

1. *Озеров А.Ю.* Ключевской вулкан: вещество, динамика, модель. М.: ГЕОС, 2019. 306 с.
2. *Озеров А.Ю., Гирина О.А., Мельников Д.В. и др.* Вулкан Ключевской: новый побочный прорыв им. Г.С. Горшкова, 2021 г. (п-ов Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2021. № 1. Вып. 49. С. 5-9. DOI: 10.31431/1816-5524-2021-1-49-5-9
3. *Пийп Б.И.* Ключевская сопка и ее извержения в 1944-1945 гг. и в прошлом. // Труды лаборатории вулканологии АН СССР. 1956. Вып. 11. 308 с.
4. *Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И.* Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об ее извержениях, землетрясениях, деформациях и глубинном строении // Вулканология и сейсмология. 2010. № 1. С. 3-35.
5. *Хубуня С.А., Гонтовая Л.И., Соболев А.В. и др.* К вопросу о магматических очагах под вулканом Ключевской // Вулканология и сейсмология. 2018. № 2. С. 14-29.
6. *Bergal-Kuvikas O., Nakagawa M., Kuritani T. et al.* A petrological and geochemical study on time-series samples from Klyuchevskoy volcano, Kamchatka arc // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2017. V. 172. № 5. P. 1-16.
7. *Takada A.* Cyclic flank-vent and central-vent eruption patterns // Bulletin of Volcanology. 1997. V. 58. P. 539-556.