

УДК 551.21+552.3+550.34

## О СМЕШЕНИИ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ И МАГНЕЗИАЛЬНЫХ МАГМ НА ВУЛКАНЕ КЛЮЧЕВСКОЙ (КАМЧАТКА)

© 2023 г. С. А. Хубуная<sup>а</sup> \*, В. С. Хубуная<sup>а</sup> \*\*, А. П. Максимов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бульвар Пуйна, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

\*e-mail: hbsa@kscnet.ru

\*\*e-mail: vissarion69@bk.ru

Поступила в редакцию 17.06.2022 г.

После доработки 15.09.2022 г.

Принята к публикации 03.11.2022 г.

Признаки смешения умереннокалиевых магнезиальных и высокоглиноземистых магм на вулкане Ключевской выявлены на основе анализа состава минералов и геохимических особенностей элементов-примесей во время кристаллизации. Минералогические особенности и распределение Mg, Fe, Cr, Ni, Co, Al в оливинах и клинопироксенах магнезиальных базальтов и высокоглиноземистых андезибазальтов побочных и вершинных извержений 1938, 1966, 1945 и 1994 гг. вулкана Ключевской свидетельствуют об инъекции магнезиальных базальтовых расплавов в высокоглиноземистую магму.

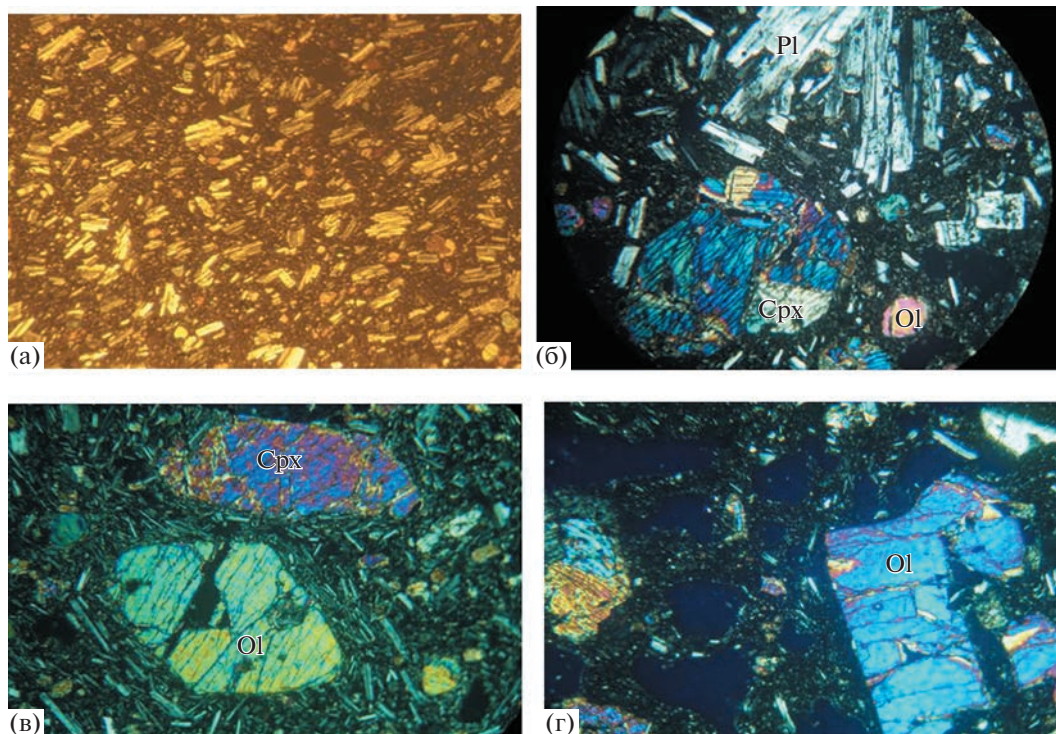
**Ключевые слова:** минерал, высокоглиноземистый, магнезиальный, вулкан, Ключевской, Камчатка

**DOI:** 10.31857/S020303062270002X, **EDN:** ARCTHW

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных петрологических проблем высокоглиноземистого вулканизма островных дуг является проблема его источника. Ни один из наиболее распространенных типов высокоглиноземистых базальтов, развитых в пределах этих планетарных структур, не может быть получен непосредственным плавлением вещества мантии, описанного многими авторами [Балашов, 1976, 1984; Sun, McDonough, 1989; Hofman, 1988; Wood, 1979; и др.]. Для Ключевской группы вулканов эта проблема стоит наиболее остро, так как здесь на ограниченном пространстве (площадь Ключевской группы вулканов 6500 км<sup>2</sup>) представлены продукты двух типов магм, определяющих геохимическую зональность островных дуг: умереннокалиевой магнезиальной, высокоглиноземистой и высококалиевой субщелочной [Jakes, Gill, 1970; Jakes, White, 1972; Леонова, Кирсанов, 1974; Волюнец и др., 1976, 1999; Перепелов, 2003; Хубуная и др., 2016]. Понимание проблемы лежит в возможности разноглубинного частичного плавления вещества мантии и дальнейшего фракционирования и смешения магм в промежуточных магматических камерах. На основании численного моделирования магнезиальных и высокоглиноземистых базальтовых магм (в системе минерал–расплав) вулкана Ключевской предложена виртуальная модель генезиса высокоглиноземистых расплавов [Арискин и др., 1995]. Авторы

предлагаемой статьи поддерживают виртуальную модель образования высокоглиноземистых расплавов. В то же время во всех побочных высокоглиноземистых и магнезиальных лавовых потоках базальтов и андезибазальтов – доисторических, исторических и современных извержений вулкана Ключевской – присутствуют “неравно-весные” высокомагнезиальные оливины и клинопироксены [Хубуная и др., 2007, 2018; Хубуная, Хубуная, 2018]. Эти минералы не могли кристаллизоваться из расплавов соответствующих химическим составом вмещающих их базальтов [Хубуная и др., 1993]. В предложенной модели генезиса высокоглиноземистых расплавов [Арискин и др., 1995] этот петрографический феномен не рассматривается. Наиболее информативными минералами для смешения магнезиальных и высокоглиноземистых расплавов вулкана Ключевской во время кристаллизации являются оливины и клинопироксены, которые фиксируются в магнезиальных и высокоглиноземистых вулканических образованиях (рис. 1). Эта статья посвящена выяснению возможности смешения умереннокалиевых магнезиальных и высокоглиноземистых магм на основании изучения распределения Mg, Fe, Cr, Ni, Co, Al в оливинах и клинопироксенах базальтов и андезибазальтов современных побочных и вершинных извержений 1938, 1945, 1966 и 1994 гг. вулкана Ключевской.



**Рис. 1.** Микрофотографии шлифов.

а — высокоглиноземистый андезибазальт, вершинное извержение 1994 г.; б — высокоглиноземистый андезибазальт, лавовый поток Б.И. Пийпа; в — магнезиальный базальт лавового потока Булочка; г — магнезиальный базальт; Pl — плагиоклаз, Cpx — клинопироксен, Ol — оливин.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

### *Методика отбора и подготовки пород для изучения их химических составов*

Аналитические работы продуктов вулканической деятельности были выполнены в Институте химии им. Макса Планка (г. Мейнц, Германия) в рамках гранта академика А.В. Соболева по проекту Пауля Вольфганга. Главные элементы в породах определялись в Институте вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН методами масс-спектрометрического и силикатного анализов. Подготовка проб для масс-спектрометрического анализа состояла из следующего. Породы измельчались до состояния пудры и спекались в стекло с помощью иридиевого нагревателя. Главные элементы в стеклах (после спекания измельченных пород в иридиевом нагревателе) были проанализированы на масс-спектрометре ELEMENT-2 (Thermo Scientific, Англия), с ионизацией в индуктивно-связанной плазме с лазерным отбором вещества (LA-ICP-MS). Погрешность определения концентрации, оцененная по воспроизведению стандарта, не превышала 5 отн. % (две стандартные ошибки) для содержаний более 1 г/т и 10 отн. % для концентраций около 0.1 г/т.

### *Методика отбора и подготовки минералов для работы на рентгеноспектральных микроанализаторах*

Из раздробленных пород, на установке по разделению минералов с различной плотностью, в трибромметане были выделены смешанные фракции оливинов и клинопироксенов. Смешанные фракции минералов с помощью микроскопа были разделены на мономинеральные фракции. Одновременно отбиралось до 600 минералов. Отобранные минералы помещались в эпоксидную смолу для изготовления препаратов. После отвердевания, полученные препараты полировались для работы на рентгеноспектральных микроанализаторах. Главные элементы и элементы-примеси в оливинах, клинопироксенах и природно закаленных стеклах расплавных включений определялись на электронном микроанализаторе “Jeol JXA 8200 SuperProbe”. Пироксены анализировались при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда 20 нА с использованием эталона природного авгита “USNM 164905” [Jarosevich et al., 1980] с типичной погрешностью менее 1–2 отн. %. Оливины были проанализированы по специальной методике, позволяющей достигать точности 20–30 г/т (две стандартные ошибки) для Ni, Ca, Mn, Al, Ti, Cr,

**Таблица 1.** Составы андезибазальтов и базальтов вулкана Ключевской, вес. %

| № п/п                          | 1      | 2     | 3     | 4     | 5      | 6     | 7      | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
|--------------------------------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 54.45  | 54.13 | 54.38 | 54.98 | 53.46  | 53.24 | 53.93  | 53.16 | 54.11 | 54.15 | 52.19 | 52.78 |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.1    | 1.12  | 0.76  | 1.02  | 1.01   | 0.69  | 1.14   | 0.87  | 0.95  | 1.03  | 0.81  | 0.67  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17.42  | 18.17 | 18.31 | 18.04 | 15.37  | 16.78 | 16.91  | 15.74 | 16.96 | 16.94 | 14.15 | 14.88 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.45   | н.о.  | 2.98  | 1.43  | 2.59   | 2.35  | 3.45   | н.о.  | н.о.  | н.о.  | н.о.  | 3.35  |
| FeO                            | 5.94   | 8.58  | 5.3   | 6.26  | 6.13   | 6.21  | 5.51   | 8.66  | 8.32  | 8.3   | 8.29  | 5.82  |
| MnO                            | 0.29   | 0.15  | 0.15  | 0.14  | 0.19   | 0.15  | 0.20   | 0.18  | 0.18  | 0.15  | 0.17  | 0.15  |
| MgO                            | 5.12   | 4.51  | 4.5   | 5.1   | 8.12   | 6.65  | 5.74   | 6.68  | 5.82  | 5.98  | 10.4  | 8.81  |
| CaO                            | 8.31   | 8.16  | 8.64  | 8.2   | 9.42   | 8.99  | 8.57   | 9.17  | 8.87  | 8.46  | 9.98  | 9.71  |
| K <sub>2</sub> O               | 1.19   | 1.05  | 1.54  | 1.15  | 1.13   | 0.89  | 1.07   | 0.94  | 0.92  | 1.06  | 0.6   | 0.98  |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.43   | 3.52  | 3.16  | 3.04  | 2.97   | 2.85  | 3.23   | 2.93  | 3.03  | 3.18  | 2.42  | 2.61  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.32   | 0.13  | н.о.  | 0.2   | 0.19   | 0.19  | 0.27   | 0.17  | 0.17  | 0.21  | 0.12  | 0.16  |
| Сумма                          | 100.02 | 99.53 | 99.79 | 99.56 | 100.06 | 99.3  | 100.02 | 98.51 | 99.33 | 99.48 | 99.14 | 99.92 |

Примечание. 1 – лава вершинного кратера извержения 1937 г. [Меняйлов, 1947]; 2 – лава вершинного кратера извержения 1994 г. (аналитик Д.А. Кузьмин); 3 – шлаковые лапилли из вершинного кратера, извержение 1937 г. [Меняйлов, 1947]; 4 – шлаковые лапилли из вершинного кратера, извержение 1994 г. (аналитик Н.А. Соловьева); 5 – кратер Билукай [Набоко, 1938]; 6 – лавовый поток Билукай (аналитик А.М. Округина). Лавовые потоки побочных извержений 1938 г. (аналитик Д.А. Кузьмин): 7 – Козей, 8 – Тиранус, 9 – Невидимка, 10 – лавовый поток Б.И. Пийпа (аналитик Д.А. Кузьмин), 11 – обломки магнезиальных базальтов пирокластического потока 1994 г. (аналитик Д.А. Кузьмин), 12 – лава потока Киргурич (аналитик А.М. Округина); н.о. – не определялся.

Со и 0.02 мол. % – для Mg, Fe и Si, при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда 300 нА [Sobolev et al., 2007].

## ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ

### *Краткое геологическое положение умереннокальцевых высокоглиноземистых андезибазальтов и базальтов*

С 7 сентября по 2 октября 1994 г. происходило вершинное эффузивно-эксплозивное извержение вулкана Ключевской, которое имело в основном стромболианский характер [Озеров и др., 1996]. 1–2 октября вершинное извержение закончилось мощными (до 14 км высотой) субплинианскими выбросами пеплов и пирокластических потоков. Для изучения определения признаков смешения магнезиальных и высокоглиноземистых магм были исследованы шлаковые лапилли и лавовые потоки, которые извергались в стромболианский этап вершинного извержения (табл. 1). Кроме того, были опробованы обломки лав магнезиальных базальтов пирокластических потоков [Хубуная и др., 2007, 2018]. Для изучения возможности взаимодействия магнезиальных и высокоглиноземистых магм были изучены оригинальные высокоглиноземистые андезибазальты лавовых потоков побочного извержения им. Б.И. Пийпа на

северо-восточном склоне вулкана Ключевской [Кирсанов, Марков, 1979; Кирсанов, Важеевская, 1969; Важеевская, 1972; Озеров, Хубуная, 1992; Хубуная, Хубуная, 2018]. Для этих же целей были привлечены оригинальные материалы высокоглиноземистых андезибазальтов по вулканическому извержению А.Н. Заварицкого [Заварицкий, 1931] и по вулканическому извержению магнезиальных андезибазальтов Билукай 1937–1938 гг. [Набоко, 1947] на восточном склоне вулкана Ключевской. Это извержение, которое началось с излияния высокоглиноземистых андезибазальтов из вершинного кратера, а закончилось побочными потоками магнезиальных и высокоглиноземистых андезибазальтов и базальтов, имеет общее название – извержение Билукай (см. табл. 1). Последовательность извержения вулканических продуктов 1938 г. заключалась в следующем. Вначале была сформирована эксплозивная воронка “Козей” (высота 1800 м). Затем несколько лавовых потоков: “Невидимка” (высота 1160 м), “Тиранус” (высота 1000 м), “Билукай” (высота 900 м) [Меняйлов, 1947; Набоко, 1947].

### *Петрографические особенности высокоглиноземистых андезибазальтов*

Петрографическая характеристика исследуемых высокоглиноземистых андезибазальтов по-

**Таблица 2.** Представительные составы оливинов из магнезиальных базальтов пирокластического потока вершинного извержения 1994 г. вулкана Ключевской, мас. %

| № п/п<br>окислы                | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 40.55 | 39.65 | 40.43 | 40.09 | 39.56 | 39.78 | 39.32 | 39.73 | 39.49 | 39.25 | 38.73 | 38.60 | 38.34 |
| FeO                            | 10.06 | 10.14 | 11.25 | 12.65 | 13.07 | 14.48 | 14.81 | 15.88 | 17.16 | 18.03 | 18.78 | 19.27 | 20.41 |
| MnO                            | 0.17  | 0.17  | 0.19  | 0.21  | 0.22  | 0.22  | 0.23  | 0.25  | 0.29  | 0.29  | 0.30  | 0.32  | 0.35  |
| MgO                            | 48.97 | 48.30 | 48.19 | 47.17 | 46.34 | 45.65 | 45.14 | 44.73 | 43.69 | 43.09 | 42.28 | 41.75 | 40.93 |
| CaO                            | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.13  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.13  | 0.13  | 0.13  | 0.13  | 0.14  |
| NiO                            | 0.30  | 0.29  | 0.29  | 0.28  | 0.23  | 0.21  | 0.19  | 0.16  | 0.16  | 0.15  | 0.12  | 0.10  | 0.09  |
| CoO                            | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.04  | 0.05  | 0.04  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.02  | 0.01  | 0.02  | 0.01  | 0.01  | 0.01  | 0.01  |
| Fo                             | 90    | 89    | 88    | 87    | 86    | 85    | 84    | 83    | 82    | 81    | 80    | 79    | 78    |

Примечание. Fo =  $Mg \times 100 / Fe^{2+} + Mg$  (мол. %).

бочных прорывов Ключевского вулкана подробно освещена во многих публикациях [Важеевская, 1972; Ермаков, 1977; Озеров, Хубуная, 1992; Пийп, 1956; Хубуная и др., 1993; и др.]. Авторы этой статьи подчеркивают только те петрографические особенности высокоглиноземистых андезибазальтов, которые могут помочь в решении поставленной задачи — определении признаков смешения высокоглиноземистой и магнезиальной магмы.

Высокоглиноземистые андезибазальты вулкана Ключевской относятся к петрографическому типу “плагиобазальтов” [Заварицкий, 1931]. Наиболее характерной чертой этих пород является резкое преобладание плагиоклаза над темноцветными минералами. При этом наблюдаются постепенные переходы размеров кристаллов от микролитов до крупных (0.8–1 мм) порфировых выделений, так называемая “серийно-порфировая” структура породы (см. рис. 1а, 1б). Следует подчеркнуть, что если лейстообразные фенокристаллы плагиоклаза могут достигать в породе такой величины, то фенокристаллы темноцветных минералов, оливинов и клинопироксенов обычно имеют размер 0.2–0.5 мм [Заварицкий, 1931]. При этом, как отмечали исследователи, изучавшие побочные извержения 1945 и 1966 гг., количество кристаллов темноцветных минералов возрастает к концу извержения [Пийп, 1956; Важеевская, 1972]. Наблюдаются лишь различия в размерах, количестве кристаллов и структуре основной массы. В основной массе присутствуют те же минералы, а также магнетит.

Второй петрографической особенностью рассматриваемых высокоглиноземистых андезиба-

зальтов, характерной для всех побочных прорывов вулкана Ключевской, являются редкие крупные (до 3–5 мм) идиоморфные высокомагнезиальные кристаллы и сростки кристаллов оливинов (Fo<sub>90–85</sub>) и клинопироксенов ( $Mg\# = 100 \cdot Mg / (Mg + Fe^{2+})$ ). В высокоглиноземистых андезибазальтах вершинного извержения 1994 г. вулкана Ключевской подобные крупные сростки минералов присутствуют очень редко. В андезибазальтах лавового потока Билюкай было проведено численное моделирование в системе минерал-расплав по программе “ПЕТРОЛОГ” [Хубуная и др., 1993]. Из этих расчетов следует, что оливины и клинопироксены с магнезиальностью выше Fo<sub>84</sub> не могли кристаллизоваться из высокоглиноземистых магм базальтового и андезибазальтового составов (см. рис. 1в, 1г). Очевидно, это кристаллы, которые образовались из более высокомагнезиальных базальтовых расплавов [Хубуная и др., 1993, 2007, 2018]. По существу их можно отнести к ксенокристаллам (табл. 2 и 3). Об этом свидетельствуют составы оливинов андезибазальтов вершинных и побочных лавовых потоков. Фенокристаллы оливинов из высокоглиноземистых андезибазальтов лавовых потоков и шлаковых лапилли вершинного извержения 1994 г. характеризуются магнезиальностью Fo<sub>80</sub>. В то же время, магнезиальность оливинов побочного высокоглиноземистого андезибазальтового лавового потока Б.И. Пийпа варьирует в широких пределах Fo<sub>90–80</sub>. Ксенокристаллы оливинов характеризуются чистым незональным высокомагнезиальным ядром, иногда отороченным узкой каймой, переполненной стекловатыми и газово-жидкими микровключениями. Магнезиальность краевых частей описанных кристаллов оливинов

**Таблица 3.** Представительные составы оливинов из высокоглиноземистых андезибазальтов лавового потока вершинного извержения 1994 г. вулкана Ключевской, мас. %

| № п/п<br>окислы                | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 38.96 | 39.12 | 38.87 | 38.93 | 38.04 | 38.50 | 38.09 | 37.69 | 37.96 | 37.92 | 37.58 |
| FeO                            | 19.21 | 20.85 | 21.21 | 21.94 | 23.41 | 24.29 | 25.15 | 25.96 | 25.96 | 26.73 | 29.02 |
| MnO                            | 0.30  | 0.35  | 0.35  | 0.40  | 0.44  | 0.48  | 0.49  | 0.49  | 0.50  | 0.52  | 0.60  |
| MgO                            | 42.25 | 40.73 | 40.57 | 40.02 | 38.46 | 37.85 | 37.25 | 36.79 | 36.42 | 35.72 | 33.88 |
| CaO                            | 0.12  | 0.15  | 0.13  | 0.17  | 0.20  | 0.22  | 0.23  | 0.18  | 0.22  | 0.22  | 0.23  |
| NiO                            | 0.13  | 0.07  | 0.08  | 0.06  | 0.04  | 0.04  | 0.04  | 0.04  | 0.04  | 0.04  | 0.03  |
| CoO                            | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.01  | 0.01  | 0.00  | 0.01  | 0.01  | 0.01  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| Fo                             | 80    | 78    | 77    | 76    | 75    | 74    | 73    | 72    | 71    | 70    | 68    |

Примечание. Fo — соответствует обозначениям в табл. 2.

лишь незначительно смещена в сторону уменьшения этого параметра по сравнению с участками их ядер. Ксеногенные оливины обладают широкими интервалами магнезиальности Fo<sub>90–85</sub>. По габитусу и химическому составу ксеногенные оливины высокоглиноземистых андезибазальтов побочного извержения 1966 г. сходны с оливинами магнезиальных базальтов лавового потока 1938 г. Билюкай и с оливинами из обломков магнезиальных базальтов пирокластических потоков извержения 1994 г.

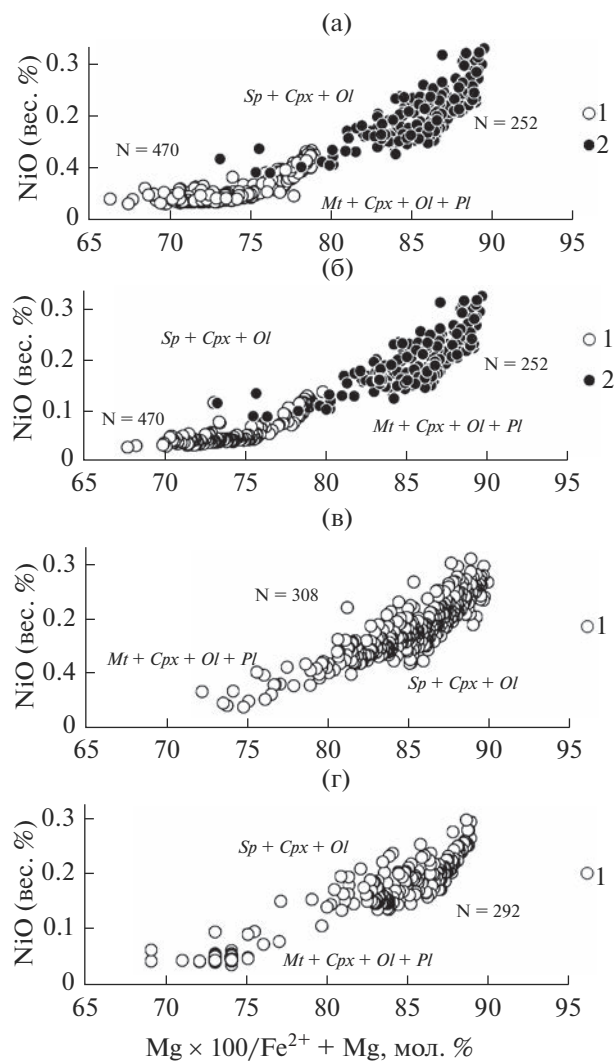
## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Сравнение составов Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO, CoO в оливинах высокоглиноземистых андезибазальтов побочных прорывов Пийпа, Билюкай и оливинах извержения 1994 г.*

В работах [Озеров, Хубуная, 1992; Хубуная и др., 1993] было показано, что в магнезиальных и высокоглиноземистых базальтах и андезибазальтах вулкана Ключевской присутствуют “неравно-весные” ассоциации оливинов и клинопироксенов. Получены новые данные по геохимии главных и редких элементов в оливинах и клинопироксенах побочных и вершинных извержений 1938, 1966, 1994 гг. Результаты этих работ отражают кристаллизацию минералов в разных физико-химических условиях несмотря на то, что они находятся в одном лавовом потоке и даже в одном образце [Хубуная, Хубуная, 2018; Хубуная и др., 2018]. Распределение Mg, Fe, Cr, Ni, Co, Al в оливинах высокоглиноземистых и магнезиальных андезибазальтов и базальтов вершинных и побочных извержений полностью подтверждают геохимические особенности этих вулканических пород.

Оливины магнезиальных базальтов пирокластического потока финальной стадии вершинного извержения 1994 г. и оливины высокоглиноземистых андезибазальтов лавового потока и шлаковых лапилли стромболианской стадии этого же извержения характеризуются разным поведением “элементы-примеси” во время кристаллизации. В магнезиальных базальтах обломков пирокластического потока содержание NiO и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в оливинах резко падает от 0.3% до 0.1% и от 0.05% до 0.01% соответственно. С уменьшением их магнезиальности от Fo<sub>90</sub> до Fo<sub>80</sub> (рис. 2, 3а, 3б). Можно отметить еще одну закономерность в распределении составов. На рис. 2 видно, что единичные составы (см. рис. 2а, 2б) и группы точек (см. рис. 2в, 2г) выделяются более высоким содержанием NiO от большинства других составов при одной величине магнезиальности. Именно такое поведение NiO является типичным для оливинов, которые кристаллизовались из гибридных магм [Горбач, Портнягин, 2011]. Концентрации Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в оливинах высокоглиноземистых андезибазальтов лавовых потоков и шлаковых лапилли вершинного извержения 1994 г. с падением магнезиальности оливинов от Fo<sub>80</sub> до Fo<sub>70</sub> почти не меняются. Они остаются на уровне 0.01–0.005% (см. рис. 3а, 3б). Содержание NiO в оливинах высокоглиноземистых андезибазальтов лавового потока и шлаковых лапилли вершинного извержения 1994 г. варьирует от 0.12 до 0.05% с падением магнезиальности оливинов от Fo<sub>80</sub> до Fo<sub>70</sub> (см. рис. 2а, 2б).

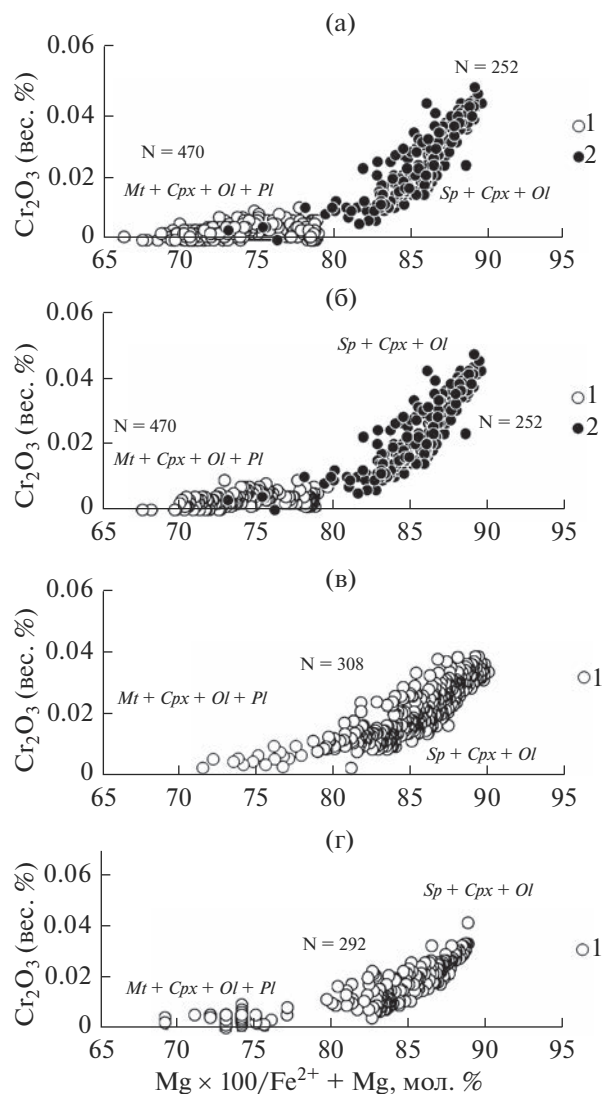
В лавовых потоках высокоглиноземистых андезибазальтов побочных извержений Билюкай и Пийпа присутствуют оливины, соответствующие по составу оливинам как магнезиальных базальтов, так и оливинам высокоглиноземистых анде-



**Рис. 2.** Распределение NiO в оливинах магнезиальных и высокоглиноземистых базальтов и андезибазальтов вулкана Ключевской.

а – 1 – оливины высокоглиноземистых андезибазальтов шлаковых лапилли вершинного извержения 1994 г., 2 – оливины обломков магнезиальных базальтов пирокластического потока вершинного извержения 1994 г.; б – 1 – оливины высокоглиноземистых андезибазальтов лавового потока вершинного извержения 1994 г., 2 – оливины обломков магнезиальных базальтов пирокластического потока вершинного извержения 1994 г.; в – 1 – оливины магнезиальных андезибазальтов лавового потока Билукай, извержение 1938 г.; г – 1 – оливины высокоглиноземистых андезибазальтов лавового потока Б.И. Пийпа, извержение 1966 г.; Sp, Ol, Cpx, Pl, Mt – шпинель, оливин, клинопироксен, плагиоклаз, магнетит соответственно. N – количество анализов.

зибазальтов (см. рис. 2, 3в, 3г). Следует подчеркнуть, что высокомагнезиальные ксенокристаллы оливинов содержатся не только в отдельных лавовых потоках высокоглиноземистых андезибазальтов, но даже в одном образце этих пород. При



**Рис. 3.** Распределение Cr₂O₃ в оливинах магнезиальных и высокоглиноземистых базальтов и андезибазальтов вулкана Ключевской.

Обозначения точек соответствуют символам на рис. 2.

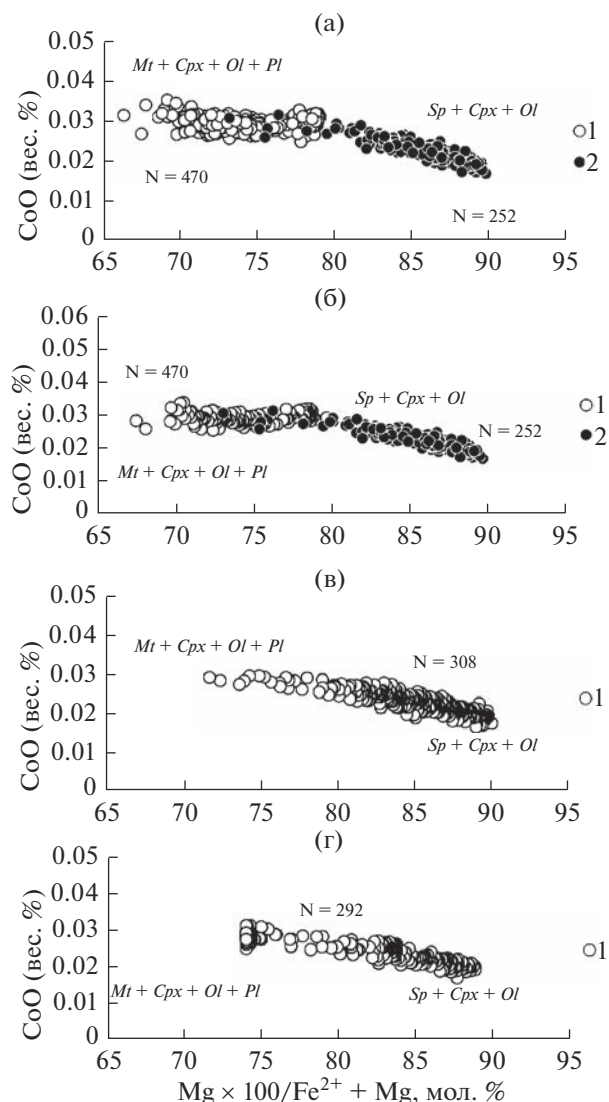
этом в высокоглиноземистых лавовых потоках присутствуют два типа оливинов. Одни из них, по количественным соотношениям NiO и Cr₂O₃ и изменению их концентраций с уменьшением магнезиальности ксенокристаллов оливинов, полностью повторяют таковые в фенокристаллах оливинов магнезиальных базальтов пирокластического потока (см. рис. 2а, 2б).

Другая часть оливинов, по содержанию NiO и Cr₂O₃ и изменению их концентраций с уменьшением магнезиальности оливинов, полностью совпадает с оливинами высокоглиноземистых андезибазальтов лавового потока и шлаковых лапилли вершинного извержения 1994 г. (см. рис. 2, 3а, 3б).

Содержание  $\text{CoO}$  в оливинах магнезиальных базальтов пирокластического потока вершинного извержения 1994 г., с падением их магнезиальности от  $\text{Fo}_{90}$  до  $\text{Fo}_{80}$ , увеличиваются в 2 раза — от 0.015 до 0.03% (рис. 4а, 4б). Концентрации в оливинах высокоглиноземистого лавового потока и шлаковых лапилли стромболианского этапа вершинного извержения 1994 г. с падением магнезиальности оливинов в тех же параметрах остаются постоянными — на уровне 0.03% (см. рис. 4а, 4б). В лавовых потоках магнезиальных и высокоглиноземистых андезибазальтов побочных извержений Билукай и Пийпа фиксируются две группы оливинов. Одни, с магнезиальностью  $\text{Fo}_{90-80}$  по составам  $\text{CoO}$  полностью соответствуют оливинам магнезиальных базальтов пирокластического потока. Другие — с магнезиальностью  $\text{Fo}_{80-70}$  по составам  $\text{CoO}$  близки оливинам лавовых потоков и шлаковых лапилли высокоглиноземистых андезибазальтов вершинного извержения 1994 г. (см. рис. 4в, 4г). При этом концентрации  $\text{CoO}$  и изменение его содержаний в оливинах, с падением магнезиальности последних, полностью повторяют таковые в магнезиальных базальтах пирокластического потока и высокоглиноземистых андезибазальтах лавового потока и шлаковых лапилли вершинного извержения 1994 г. (см. рис. 4в, 4г). Можно констатировать, что в высокоглиноземистых андезибазальтах Б.И. Пийпа 1966 г. фиксируются оливины, которые кристаллизовались из высокоглиноземистых расплавов, что само по себе не вызывает сомнений. Но в этих же лавовых потоках присутствуют оливины ( $\text{Fo}_{90-80}$ ), которые кристаллизовались из магнезиальных расплавов. Следует подчеркнуть, что оливины, которые кристаллизовались из магнезиальных расплавов, присутствуют во всех без исключения высокоглиноземистых андезибазальтах побочных лавовых потоков вулкана Ключевской.

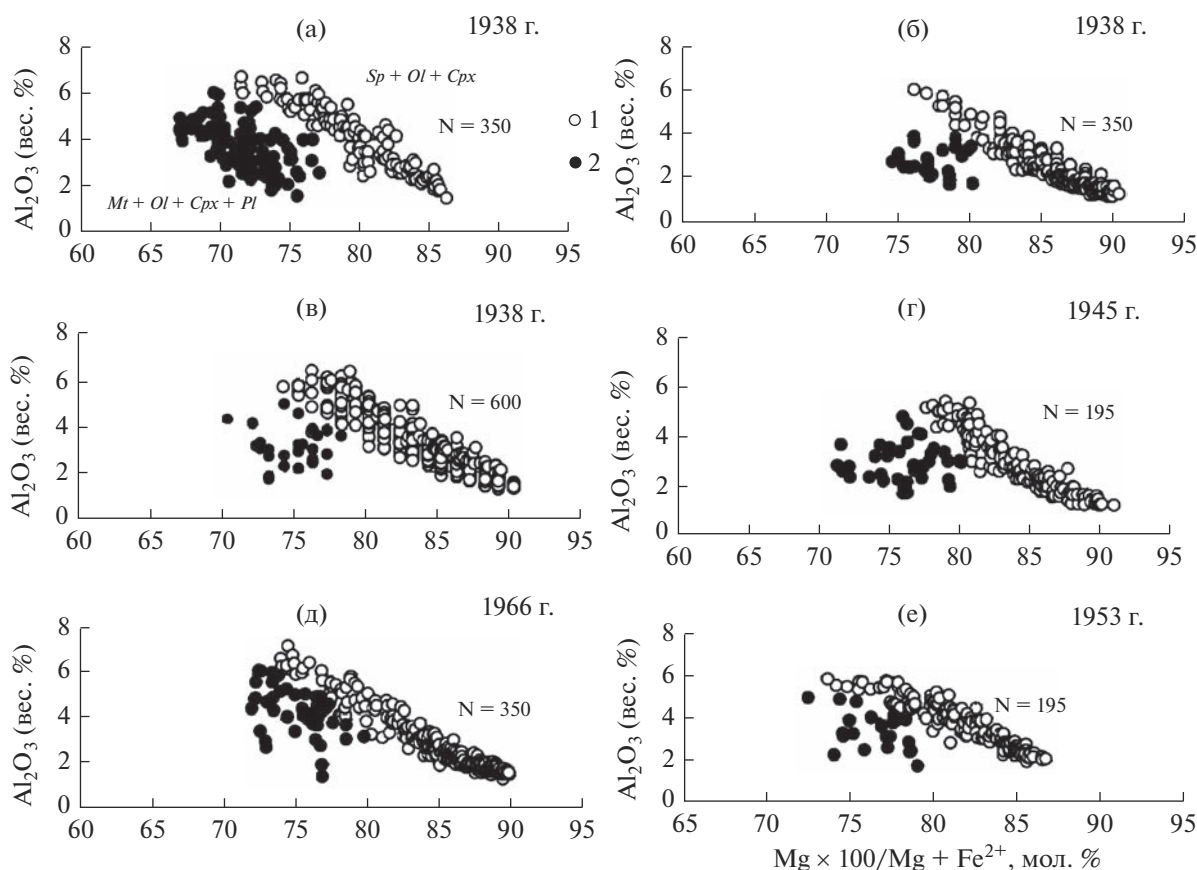
*Сравнение химических составов клинопироксенов высокоглиноземистых андезибазальтов побочных прорывов Билукай, Тиранус, Невидимка, Пийпа*

Подтверждением кристаллизации оливинов из магнезиальной и высокоглиноземистой магмы, находящихся в одном лавовом потоке, является изменение содержаний  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в клинопироксенах при уменьшении их магнезиальности в одном и том же лавовом потоке и одном и том же образце. Во всех побочных прорывах высокоглиноземистых и магнезиальных андезибазальтов 1938, 1945, 1953 и 1966 гг. фиксируются две группы клинопироксенов (рис. 5). В одной группе клинопироксенов концентрация  $\text{Al}_2\text{O}_3$  постоянно возрастает до 6–8% с падением их магнезиальности — от  $\text{Mg}\#_{90}$  до  $\text{Mg}\#_{70}$ . В другой группе клинопироксенов из того же лавового потока после



**Рис. 4.** Распределения  $\text{CoO}$  в оливинах магнезиальных и высокоглиноземистых базальтов и андезибазальтов вулкана Ключевской. Обозначения точек соответствуют символам на рис. 2.

магнезиальности  $\text{Mg}\#_{80}$  содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  резко снижается до 1–2% [Хубуная и др., 2018; Хубуная, Хубуная, 2019]. Очевидно, непрерывный тренд обогащения клинопироксенов  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с падением их магнезиальности от  $\text{Mg}\#_{90}$  до  $\text{Mg}\#_{80}$  обусловлен кристаллизацией  $\text{Cpx}$  в режиме  $\text{Sp-Cpx-Ol}$  котектики в глубинной камере вулкана Ключевской. Эти клинопироксены поступали в малоглубинную камеру вулкана вместе с магнезиальным расплавом и оливинами  $\text{Fo}_{90-80}$ . Клиннопироксены, в которых содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  резко снижается по мере падения их магнезиальности, кристаллизовались в режиме  $\text{Mt-Ol-Cpx-Pl}$  котектики, по-видимому, в малоглубинной камере этого вулкана.



**Рис. 5.** Составы клинопироксенов в андезибазальтах лавовых потоков побочных извержений вулкана Ключевской. а — высокоглиноземистые андезибазальты лавового потока Невидимка; б — магнезиальные андезибазальты лавового потока Билукай; в — магнезиальные андезибазальты лавового потока Тиранус; г — высокоглиноземистые андезибазальты лавового потока им. академика А.Н. Заварицкого; д — магнезиальные андезибазальты конуса Б.И. Пийпа; е — высокоглиноземистые андезибазальты лавового потока им. академика Д.С. Белянкина. 1 — клинопироксены предполагаемых магнезиальных магм; 2 — клинопироксены предполагаемых высокоглиноземистых магм; N — количество анализов.

на [Хубуная и др., 2019]. Кристаллизация плагиоклаза обедняла остаточный расплав  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Из этого остаточного расплава кристаллизовались клинопироксены с магнезиальностью ниже  $\text{Mg}^{\#}_{80-78}$  в малоглубинной камере вулкана Ключевской [Хубуная, Хубуная, 2019]. Дополнительным подтверждением этого положения являются две группы клинопироксенов, которые кристаллизовались при одной магнезиальности, но при разных физико-химических условиях в разных магматических камерах [Хубуная и др., 2018].

Наиболее вероятный сценарий побочных извержений вулкана Ключевской представляется в следующем. Магнезиальная магма с клинопироксенами и оливинами  $\text{Fo}_{90-80}$  из глубинного очага [Гонтовая и др., 2004; Koulikov, 2011; Хубуная и др., 2007 и др.] внедряется в малоглубинную камеру высокоглиноземистой магмы [Хубуная и др., 2018] и вместе с ее материалом извергается на поверхность. Хорошим подтверждением этого положения яв-

ляется последовательность составов высокоглиноземистых и магнезиальных андезибазальтов во время наиболее крупного извержения Ключевского вулкана 1937–1938 гг. [Меняйлов, 1947; Набоко, 1947]. Извержение вулкана в 1937 г. началось из его вершины лавами, вулканическими бомбами и шлаковыми лапилли высокоглиноземистых андезибазальтов (см. табл. 1). Оно закончилось через два года побочными лавовыми потоками высокоглиноземистых и магнезиальных андезибазальтов с многочисленными участками, обогащенными высокомагнезиальными кристаллами оливинов и клинопироксенов. Об этом также свидетельствуют более поздние публикации о лавовом потоке Билукай [Хубуная и др., 1993, 2018] с многочисленными высокомагнезиальными кристаллами оливинов и клинопироксенов, которые равновесны мантийным выплавкам. Все это свидетельствует об инъекциях высокомагнезиальных магм в высокоглиноземистую камеру

вулкана Ключевской. Поэтому в продуктах всех побочных высокоглиноземистых андезибазальтов разновозрастных извержений вулкана Ключевской присутствуют “неравновесные” высокомагнезиальные клинопироксены и оливины  $Fo_{90-88}$ , характерные для мантийных выплавов [Lee CinTy et al., 2009].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Петрографическая и геохимическая специфика высокоглиноземистых андезибазальтов шлаковых лапилли, лавовых потоков и магнезиальных базальтов пирокластического потока вершинного извержения 1994 г. вулкана Ключевской свидетельствует о том, что в этих породах присутствуют оливины и клинопироксены, которые различаются по химическим составам. В магнезиальных базальтах составы оливинов и клинопироксенов варьируют от  $Fo_{90}$  до  $Fo_{80}$ . В оливинах и клинопироксенах высокоглиноземистых андезибазальтов шлаковых лапилли и лавовых потоков вершинного извержения 1994 г. магнезиальность оливинов варьирует от  $Fo_{80}$  до  $Fo_{65}$ . В высокоглиноземистых андезибазальтах лавовых потоков побочных прорывов в одном лавовом потоке и даже в одном образце присутствуют две группы оливинов и клинопироксенов. Они различаются по химическим составам и магнезиальности. Одни оливины и клинопироксены по химическим составам полностью соответствуют таким же минералам магнезиальных базальтов пирокластического потока. Другие — по тем же параметрам полностью соответствуют высокоглиноземистым андезибазальтам шлаковых лапилли и лавовых потоков вершинного извержения 1994 г. Следует констатировать, что часть оливинов, которые находятся в высокоглиноземистых андезибазальтах побочных прорывов вулкана Ключевской, кристаллизовались из магнезиальных расплавов и являются ксенокристаллами.

Об этом же свидетельствуют количественные соотношения  $NiO$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $CoO$  и изменение их концентраций во время кристаллизации. Они полностью повторяют изменение концентраций элементов-примесей в оливинах и клинопироксенах по мере кристаллизации магнезиальных базальтов пирокластического потока и высокоглиноземистых андезибазальтов лавового потока и шлаковых лапилли вершинного извержения 1994 г. соответственно. Изменение содержаний  $NiO$ ,  $Cr_2O_3$  и  $CoO$  в оливинах и клинопироксенах высокоглиноземистых андезибазальтов побочных прорывов также свидетельствует об их кристаллизации из двух разных магм: высокоглиноземистой и магнезиальной. Подтверждением кристаллизации клинопироксенов из двух магм являются изменения содержаний  $Al_2O_3$  в клинопироксенах при умень-

шении их магнезиальности. Во всех высокоглиноземистых андезибазальтах побочных прорывов фиксируются две группы клинопироксенов, которые также кристаллизовались из двух магм. Наиболее вероятный сценарий побочных извержений вулкана Ключевской представляется в следующем. Магнезиальная магма с клинопироксенами и оливинами  $Fo_{90-80}$  из глубинного очага внедряется в малоглубинную камеру высокоглиноземистой магмы и вместе с ее материалом извергается на поверхность.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Лаборатории “Аналитический центр” Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, академику А.В. Соболеву за возможность проведения аналитических исследований в Институте химии им. Макса Планка (г. Мейнц, Германия) и в Институте наук о Земле, Университет им. Дж. Фурье (г. Гренобль, Франция). А также выражаем искреннюю благодарность старшему научному сотруднику ИГМ СО РАН кандидату геол.-мин. наук Д.А. Кузьмину, старшему научному сотруднику ГЕОХИ РАН кандидату геол.-мин. наук В.Г. Батановой за помощь в выполнении рентгеноспектральных анализов минералов и пород.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арискин А.А., Бармина Г.С., Озеров А.Ю., Нильсен Р.Л. Генезис высокоглиноземистых базальтов Ключевского вулкана // Петрология. 1995. Т. 3. № 5. С. 496–521.
- Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука, 1976. 288 с.
- Важеевская А.А. Базальты ареальных зон Камчатки / Автореф. дис. ... кандидата геол.-мин. наук. Владивосток, 1972. 28 с.
- Вольнец О.Н., Ермаков В.А., Кирсанов И.Т., Дубик Ю.М. Петрохимические типы четвертичных вулканов Камчатки // Бюлл. вулканол. станций. М.: Наука, 1976. № 52. С. 115–126.
- Вольнец О.Н., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Ягодзински Дж. М. Харчинский и Заречный вулканы — уникальные центры позднеплейстоценовых магнезиальных базальтов на Камчатке: вещественный состав вулканических пород // Вулканология и сейсмология. 1999. № 1. С. 31–45.
- Гонтовая Л.И., Степанова М.А., Хренов А.П., Сеников С.Л. Глубинная модель литосферы в районе Ключевской группы вулканов (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2004. № 3. С. 3–11.
- Горбач Н.В., Портнягин М.В. Геологическое строение и петрология лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч, Камчатка // Петрология. 2011. № 2. С. 140–172.
- Ермаков В.А. Формационное расчленение четвертичных вулканических пород. М.: Недра, 1977. 223 с.

- Заварицкий А.Н.* Некоторые вулканические породы окрестностей Ключевской сопки на Камчатке // Записки Российского минералогического общества. 1931. № 2. Сер. II. С. 10–15.
- Кирсанов И.Т., Марков И.А.* Эволюция базальтов в процессе формирования Ключевского вулкана // Проблемы глубинного магматизма. М.: Наука, 1979. С. 80–96.
- Кирсанов И.Т., Ваджеевская А.А.* Извержение кратеров Пийпа в 1966 г. и некоторые вопросы дифференциации лав на Ключевском вулкане // Материалы III Всесоюзного вулканологического совещания “Вулканизм и глубины Земли”, Львов, 1969 г. М.: Наука, 1971. С. 157–160.
- Леонова Л.Л., Кирсанов И.Т.* Геохимия базальтов Ключевского вулкана (Камчатка) // Геохимия. 1974. № 6. С. 875–884.
- Меняйлов А.А.* Динамика и механизм извержений Ключевского вулкана в 1937–1938 гг. // Труды Лаборатории вулканологии и Камчатской вулканологической станции. М., Л.: Изд-во АН СССР, 1947. Вып. 4. С. 3–91.
- Набоко С.И.* Продукты извержения Ключевского вулкана в 1937–1938 гг. // Труды Лаборатории вулканологии и Камчатской вулканологической станции. М., Л.: Изд-во АН СССР, 1947. Вып. 4. С. 92–135.
- Озеров А.Ю., Карнов Г.А., Дроздин В.А. и др.* Динамика извержения Ключевского вулкана 7 сентября–2 октября 1994 г. (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1996. № 5. С. 3–16.
- Озеров А.Ю., Хубуная С.А.* Химизм оливинов и пироксенов как показатель связи глиноземистых и магнезиальных базальтов Ключевского вулкана // Постэруптивное минералообразование на активных вулканах Камчатки. Ч. 2. Владивосток, 1992. С. 37–61.
- Пийп Б.И.* Ключевская сопка и ее извержения в 1944–1945 гг. и в прошлом // Труды Лаборатории вулканологии. М.: Наука, 1956. № 11. 310 с.
- Перепелов А.Б.* Неогеновый субщелочной магматизм Срединного хребта Камчатки: этапы инверсии островодужного и рифтогенного геодинамических режимов (вулкан Теклетунуп) // Плюмы и проблема глубинных источников щелочного магматизма. Иркутск, 2003. С. 242–278.
- Хубуная С.А., Богоявленский С.О., Новгородцева Т.Ю., Округина А.М.* Минералогические особенности магнезиальных базальтов как отражение фракционирования в магматической камере Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1993. № 3. С. 46–68.
- Хубуная С.А., Гонтовая Л.И., Соболев А.В., Низкоус И.В.* Магматические очаги под Ключевской группой вулканов // Вулканология и сейсмология. 2007. № 2. С. 1–23.
- Хубуная С.А., Ерёмкина Т.С., Соболев А.В.* Формационная принадлежность калиевых трахиандезибазальтов побочного извержения 2012–2013 гг. вулкана Плоский Толбачик по геохимическим признакам (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2016. № 1. С. 37–55.
- Хубуная С.А., Гонтовая Л.И., Соболев А.В., Хубуная В.С.* К вопросу о магматических очагах под вулканом Ключевской // Вулканология и сейсмология. 2018. № 2. С. 14–30.
- Хубуная С.А., Хубуная В.С.* Геохимические особенности оливинов и клинопироксенов высокоглиноземистых андезибазальтов — показатели присутствия магматических очагов под вулканом Ключевской // Сборник статей ежегодной научной конференции “Теория и практика современных гуманитарных и естественных наук”. 2018. № 7. С. 297–302.
- Хубуная С.А., Хубуная В.С.* О Контаминации высокоглиноземистых андезибазальтов по геохимическим особенностям главных элементов и элементов-примесей в оливинах и клинопироксенах (вулкан Ключевской, Камчатка) // Вестник Петровской академии. 2019. № 1/2(54). С. 60–64.
- Koulakov I., Gordeev E., Dobretsov N. et al.* Feeding volcanoes of the Kluchevskoy group from the results of local earthquake tomography // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. LXXXXX. <https://doi.org/10.1029/2011GL046957>
- Hofmann A.W.* Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust // Earth Planet. Sci. Lett. 1988. V. 90. P. 297–314.
- Jarosevich F.J., Nelen J.A., Norberg J.A.* Reverence sample for electron microprobe analysis // Geostandarts News Letter. 1980. V. 4. P. 43–47.
- Jakes P., Gill J.B.* Rare earth elements and the island arc tholeiitic series // Earth Planet. Sci. Lett. 1970. V. 9. P. 17–28.
- Jakes P., White A.J.R.* Major and trace element abundances in volcanic rocks orogenic areas // Geol. Soc. Amer. Bull. 1972. V. 83. № 1. P. 29–40.
- Lee C. Ty A., Luffi P., Plank T. et al.* Constraints on the depths and temperatures of basaltic magma generation on Earth and other terrestrial planets using new thermobarometers for mafic magmas // Earth Planet. Sci. Lett. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.020>
- Sobolev A.V., Hofman A.W., Kuzmin D.A. et al.* The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts // Science. 2007. V. 316. № 5823. P. 412–417.
- Sun S.S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes // Magmatism in Ocean Basins // Geological Society Special Publication № 2. Blackwell Scientific Publications, 1989. P. 313–346.
- Wood D.A.* A variably veined suboceanic mantle-genetic significance for mid-ocean ridge basalts from geochemical evidence // J. Geology. 1979. V. 7. № 3. P. 499–503.

## **Mixing of High Alumina and Magnesium Magmas at Klyuchevskoy Volcano (Kamchatka)**

**S. A. Khubunaya<sup>1, \*</sup>, V. S. Khubunaya<sup>1, \*\*</sup>, and A. P. Maksimov<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

*\*e-mail: hubsa@kscnet.ru*

*\*\*e-mail: vissarion69@bk.ru*

Geochemical features of impurity elements and the analysis of mineral composition during crystallization allowed us to reveal traces of mixing of moderately potassic magnesium and high alumina magmas at Klyuchevskoy Volcano. Mineralogical features and distribution of Mg, Fe, Cr, Ni, Co, Al in olivines and clinopyroxenes in magnesium basalts and high alumina andesite basalts from the 1938, 1945, 1966 and 1994 flank and summit eruptions at Klyuchevskoy Volcano give evidence for injection of magnesium basaltic melts into high alumina magma.

**Keywords:** mineral, high alumina, magnesium, volcano, Klyuchevskoy, Kamchatka