

## ВУЛКАНИЧЕСКИЙ МАССИВ ЗИМИНЫХ СОПОК: ГЕОЛОГИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ ПОРОД (КЛЮЧЕВСКАЯ ГРУППА ВУЛКАНОВ, КАМЧАТКА)

© 2019 Г.Б. Флеров<sup>1</sup>, Т.Г. Чурикова<sup>1,2</sup>, Б.Н. Гордейчик<sup>2,3</sup>, В.В. Ананьев<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*Отделение геохимии Центра наук о Земле Гёттингенского университета, Гёттинген, Германия*

<sup>3</sup>*Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка, Россия*

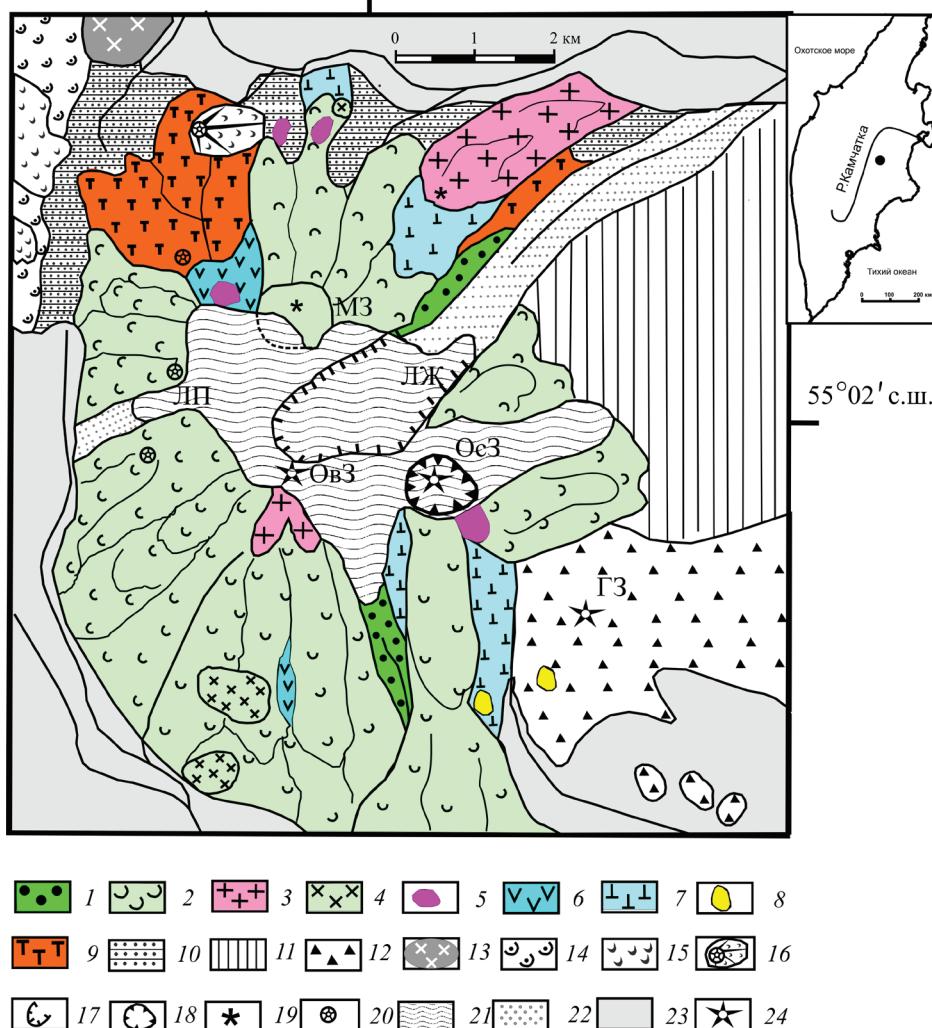
Массив Зиминых сопок знаменателен тем, что его формирование обязано совместному проявлению магм разной калиевой щелочности, которые представлены тремя породными ассоциациями (сериями) с персональными трендами эволюции. I — андезибазальты — андезиты — дациты; II — андезибазальты — андезиты промежуточного состава; III — высококалиевые андезибазальты. Различия пород выделенных серий находят свое отражение и в описанных выше минеральных ассоциациях соответствующих серий, а дискретность линий регрессии пород предполагает определенную автономность исходных магм. Наличие ортогональных трендов изменения составов минералов в андезибазальтах с вектором соответствующим повышению калиевой щелочности в породах ассоциаций свидетельствуют о существовании процесса, приводящего к обогащению этих магм калием. Делается вывод о сосуществовании в пределах единой сквозной магматической системы разноглубинных промежуточных очагов с разными условиями образования исходных дочерних андезибазальтовых магм, которые в процессе вулканической деятельности имели непосредственную связь с более глубокой материнской базальтовой магмой.

*Ключевые слова: ассоциации, андезибазальты, калиевая щелочность, очаги, массив Зиминых сопок.*

### ВВЕДЕНИЕ

Массив Зиминых сопок (рис. 1 на 1 стр. обложки, рис. 2) — вулканическое сооружение в Ключевской группе вулканов (Центральная Камчатская депрессия), образованное сросшимися постройками потухших позднеплейстоценовых стратовулканов Овальная Зиминая и Острая Зиминая с высотами 3080.8 и 2742.4 м соответственно. Формирование массива — это один из эпизодов вулканической деятельности в Ключевской группе вулканов, которая охватывает период верхнего плейстоцена (15–80 тыс. л. н.) и характеризуется интенсивным ростом позднеплейстоценовых стратовулканов (Брайцева и др., 1994; Мелекесцев и др. 1970; Певзнер и др., 2014; Чурикова и др., 2017а, 2017б; Churikova et al., 2015а, 2015б). С различной степенью полноты информация о массиве Зиминых Сопок изложена в работах (Борисова, 1966; Володавец, 1940; Володавец, Пийп, 1957; Ермаков, 1977; Иванов, 2008; Пийп, 1956; Чурикова и др., 2018; Churikova et al.,

2018а, 2018б). Геология территории, включающей массива, строение стратовулканов, а также петрография пород, слагающих их, довольно подробно описаны В.А. Ермаковым (1977). При полевых работах 1989, 2014 и 2016 гг. авторами было проведено детальное опробование пород разрезов стратовулканов в разных секторах массива. В результате петрохимического анализа вулкаников впервые было установлено значимое различие их составов по калиевой щелочности и составлена геологическая схема распределения разностей вулкаников в пределах массива. Это нашло свое отражение в персональных трендах эволюции пород трех вулканических ассоциаций (серий). Их петрохимические и геохимические характеристики опубликованы в работах (Чурикова и др., 2018; Churikova et al., 2018). Настоящая статья посвящена изучению составов породообразующих минералов пород массива с целью установления различий между составами типоморфных минеральных ассоциаций вулканических серий и соответствии их



**Рис. 2.** Схема магматических проявлений района массива Зиминых сопки. 1–9 — позднплейстоценовые магматические образования массива Зиминых сопки: 1–5 — средне-К ассоциация пород I: андезибазальты (1), андезиты (2), лавовые потоки дацитов (3), экструзии андезитов (4), экструзии дацитов (5); 6–8 — ассоциация пород II: андезибазальты (6), андезиты (7); экструзии андезитов (8); 9 — ассоциация пород III: высоко-К андезибазальты; 10–11 — среднплейстоценовые образования фундамента массива: мегаплагиофировые трахиандезибазальты (10), базальты, микродолериты (11); 12 — андезибазальты вулкана Горный Зуб; 13 — верхнплейстоценовая экструзия андезитов; 14 — позднее плейстоценовые вулканиты стратовулкана Плоский Толбачик; 15 — голоценовые вулканиты Толбачинской ареальной зоны; 16 — шлаковый конус Толбачинской ареальной зоны; 17 — обвалный цирк; 18 — кальдера; 19 — эруптивные центры побочных прорывов; 20 — шлаковые конусы; 21 — ледники; 22 — флювиогляциальные отложения; 23 — аллювиальные и пролювиальные отложения; 24 — вершины вулканов: ОсЗ — стратовулкан Острая Зиминая, ОвЗ — стратовулкан Овальная Зиминая, МЗ — эруптивный центр прорыва Малая Зиминая, ГЗ — верхнплейстоценовый разрушенный вулкан Горный Зуб, ЛЖ — ледник Желтый, ЛП — ледник Попкова. Врезка — место расположения массива. Схема составлена авторами с использованием материалов из работы (Ермаков, 1977).

**Fig. 2.** The magmatic manifestations' scheme for the area of the Ziminy Sopki Volcanic Massif: 1–9 — Late Pleistocene magmatic formations of the Ziminy Sopki Volcanic Massif: 1–5 — the I medium K rock association: andesite-basalts (1), andesites (2), dacite lava flows (3), andesite extrusions (4), dacite extrusions (5); 6–8 — the II rock association: andesite-basalts (6), andesites (7); andesite extrusions (8); 9 — the III rock association: High-K andesite-basalts; 10–11 — Middle Pleistocene formations of the massif basement: mega-plagiophyric trachyandesibasalts (10), basalts, microdolerites (11); 12 — Gorny Zub Volcano's andesite-basalts; 13 — Upper Pleistocene andesite extrusion; 14 — Later Pleistocene volcanic rocks of Plosky Tolbachik Stratovolcano; 15 — Holocene volcanic rocks of the Tolbachik areal zone; 16 — cinder cone of the Tolbachik areal zone; 17 — collapse circus; 18 — caldera; 19 — fissure eruptive centers; 20 — cinder cones; 21 — glaciers; 22 — fluvio-glacial deposits; 23 — alluvial and proluvial deposits; 24 — volcanoes' summits: OsZ — Ostraya Zimina Stratovolcano, OvZ — Ovalnaya Zimina Stratovolcano, MZ — Fissure eruptive center of Malaya Zimina, GZ — Upper Pleistocene destroyed Gorny Zub Volcano, GZh — Zhelty Glacier, GP — Popkov Glacier. The inset is the massif location. The scheme was made using the addition data from (Ermakov, 1977).

химическому составу вулканитов этих серий. Основой для исследований послужила представительная коллекция из 97 образцов.

### ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Фундамент, на котором формировался массив Зиминых сопок, сложен толщей мегаплагиофировых трахиандезибазальтов, залегающей под вулканитами массива, обрамляя его с севера, и вулканитами базальтового состава, выходы которых обнажаются к востоку. Вулканические образования фундамента представляют собой фрагмент Хапиченского плато, возраст которого по данным определения  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  соответствует среднему плейстоцену (Ермаков, 1977; Флеров и др., 2017; Calkins, 2004). Массив Зиминых сопок (рис. 2) сложен чередованием лавовых потоков и пирокластических отложений. Вершинная часть стратовулкана Овальная Зиминая срезана в результате обрушения с образованием обвального цирка шириной 500 м, заполненного ледником. Вершинная часть вулкана Острая Зиминая осложнена кальдерой обрушения шириной 1 км. На северном склоне постройки Овальной Зиминой предполагается вулканический центр с исходящими от него лавовыми потоками, названный В.А. Ермаковым (1977) Малая Зиминая, а у ее южного подножья возникли два андезитовых экструзивных купола, отчетливо выраженные в рельефе. На юго-востоке массив Зиминых Сопок примыкает к более древнему разрушенному сильно эродированному верхне-

плейстоценовому андезибазальтовому вулкану Горный Зуб (Мелекесцев и др., 1970). Массив Зиминых сопок знаменателен тем, что слагающие его вулканиты представлены породами разной калиевой щелочности, которые слагают три ассоциации:

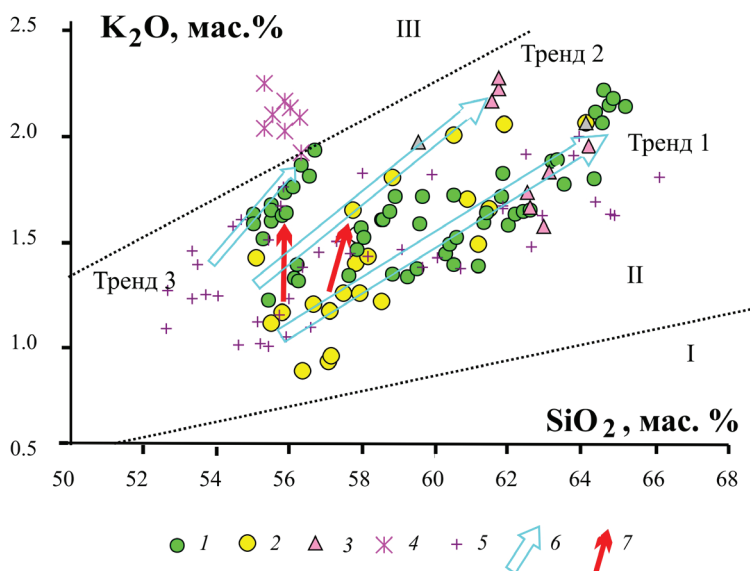
I. Средне-К породы ряда андезибазальт – андезит – дацит;

II. Андезибазальты – андезиты промежуточного состава;

III. Высоко-К андезибазальты.

Эти ассоциации соответствуют трендам 1, 2 и 3 в работе (Чурикова и др., 2018) (рис. 3). Некоторые представительные составы пород приведены в табл. 1.

Андезибазальты ассоциации I фрагментарно обнажаются в нижних частях бортов ручьев, прорезающих постройку стратовулкана, что позволяет относить их к начальной фазе формирования массива. Учитывая то, что основная масса их захоронена под более молодыми продуктами извержений, не исключено, что их роль в вулканической деятельности массива более значительна, чем можно оценить во вскрытых разрезах. Последующие вулканические проявления представлены эффузивными излияниями высоко-К андезибазальтов ассоциации III, которые в северо-западной периферии стратовулкана Овальной Зиминой слагают шлаковый конус на высоте 1780 м и исходящие от него лавовые потоки (рис. 2). Примечательно то, что эти проявления пространственно приурочены только к области развития трахиандезибазальтов



**Рис. 3.** Классификационная диаграмма  $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$  для пород массива Зиминых сопок: 1 – породы вулкана Овальная Зиминая; 2 – породы вулкана Острая Зиминая; 3 – экструзии; 4 – мегаплагиофировые трахиандезибазальты фундамента; 5 – анализы из (Иванов, 2008); 6 – тренды эволюции серий пород: ассоциации I (тренд 1), ассоциации II (тренд 2), ассоциации III (тренд 3); 7 – направления увеличения щелочности. Дискриминационные линии взяты из (Pecерillo, Taylor, 1976). Римскими цифрами обозначены поля серий: низкокалиевой (I), умереннокалиевой известково-щелочной (II), высококалиевой известково-щелочной (III). Основа рисунка взята из (Чурикова и др., 2018).

**Fig. 3.**  $\text{SiO}_2$  classification diagram –  $\text{K}_2\text{O}$  for rock from the Ziminy Sopki Massif: 1 – the rocks from Ovalnaya Zimina Stratovolcano; 2 – the rocks from Ostraya Zimina Stratovolcano; 3 – extrusions; 4 – the basement's mega-plagiophyric trachyandesibasalts; 5 – the data from (Ivanov, 2008); 6 – the evolutionary trends of the rock series from: the I association (trend 1), the II association (trend 2), the III association (trend 3); 7 – the increased alkalinity directions. The discriminatory lines data is from Pecерillo, Taylor, 1976. The roman numerals indicate series' fields: low potassium (I), medium potassium calc-alkaline (II), high potassium calc-alkaline (III). The picture's frame is from (Churikova et al., 2018).

**Таблица 1.** Представительные химические составы пород (мас. %) массива Зиминых сопок**Table 1.** Representative chemical compositions of rocks (wt.%) from the Ziminy Sopki Volcanic Massif

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10*
№ обр.	8	10	20	23	2541	29	30	2543	2550Б	Фр-19
Порода	АБ	АБ	АБ	АБ	АН	АН	АН	АН	АН	ДЦ
SiO <sub>2</sub>	54.59	55.20	55.94	56.60	57.51	59.11	60.06	61.43	61.88	63.14
TiO <sub>2</sub>	0.51	1.06	0.20	0.60	0.96	0.66	0.41	0.86	0.61	0.61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.06	15.67	18.42	18.80	17.63	16.33	17.77	16.12	17.07	17.05
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.63	2.76	3.90	0.84	2.71	1.92	2.57	2.28	2.03	2.34
FeO	5.15	6.03	3.16	5.17	5.28	5.00	3.07	4.11	3.78	3.01
MnO	0.02	0.17	0.20	0.07	0.15	0.14	0.01	0.09	0.15	0.10
MgO	6.43	5.83	6.01	5.14	3.67	4.65	4.17	3.42	3.15	2.69
CaO	9.25	8.38	8.01	8.51	7.40	6.56	7.29	6.22	5.72	5.65
Na <sub>2</sub> O	2.34	3.58	2.91	3.17	3.23	3.88	3.23	3.66	3.68	3.42
K <sub>2</sub> O	1.01	1.02	1.05	1.10	1.26	1.46	1.42	1.64	1.83	1.83
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.00	0.29	0.20	0.00	0.21	0.29	0.00	0.17	0.12	0.16
№ п/п	11	12	13	14	15	16	17*	18	19	20
№ обр	2552	15	13	2519	2543/1	24	Фр-7	2542	2550Т	Фр-21
Порода	ДЦ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АН	АН	АН	АН
SiO <sub>2</sub>	64.62	55.12	55.99	56.21	56.26	56.83	57.75	57.88	58.07	59.64
TiO <sub>2</sub>	0.76	1.00	1.03	0.80	0.89	0.35	0.81	0.90	0.78	0.66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.13	16.43	16.80	17.56	17.41	18.14	18.59	19.04	17.64	16.72
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.58	3.36	3.40	2.31	2.93	6.34	2.70	2.77	2.99	2.36
FeO	3.64	4.56	4.66	5.54	4.94	0.42	4.28	4.78	4.36	4.72
MnO	0.10	0.16	0.16	0.14	0.08	0.01	0.13	0.14	0.14	0.19
MgO	2.71	5.13	5.24	4.47	5.02	5.40	3.68	2.04	3.38	3.95
CaO	4.95	9.45	7.60	8.04	7.60	7.80	7.07	7.19	7.29	6.32
Na <sub>2</sub> O	3.28	3.39	3.60	3.37	3.36	3.25	3.04	3.53	3.60	3.53
K <sub>2</sub> O	2.06	1.13	1.23	1.40	1.31	1.45	1.65	1.53	1.52	1.72
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.18	0.28	0.29	0.16	0.18	0.00	0.29	0.20	0.22	0.18
№ п/п	21	22	23*	24	25	26	27	28	29	30
№ обр	33	2534	2540	17	2414	14	2413	2411а	К2544	К2546
Порода	АН	АН	ДЦ	АБ	АБ	АБ	АБ	ТРАБ	ГБ	ГБ
SiO <sub>2</sub>	59.93	61.93	64.14	55.44	55.52	55.85	56.69	55.89	48.98	47.34
TiO <sub>2</sub>	0.81	0.62	0.51	2.22	0.94	0.77	1.01	1.19	0.89	0.61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.59	16.17	18.37	18.55	17.31	15.70	17.22	19.67	18.48	8.57
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.96	1.67	4.54	5.44	2.17	2.71	1.96	1.93	4.04	2.49
FeO	3.77	4.59	0.85	1.92	5.75	6.78	6.13	4.99	6.17	14.41
MnO	0.16	0.12	0.00	0.00	0.13	0.18	0.04	0.09	0.18	0.28
MgO	2.65	3.40	1.31	2.42	5.26	5.19	4.55	2.78	9.98	15.96
CaO	7.11	5.90	4.59	8.06	7.78	8.66	6.84	6.99	8.49	8.77
Na <sub>2</sub> O	3.93	3.38	3.45	4.03	3.25	2.39	3.34	3.98	2.32	1.06
K <sub>2</sub> O	1.82	2.05	2.06	1.51	1.65	1.76	1.93	2.17	0.26	0.38
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.28	0.18	0.17	0.40	0.23	0.00	0.29	0.33	0.20	0.13

Примечание. 1–11 — породы ассоциации I, 12–23 — ассоциации II, 24–27 — ассоциации III, 28 — фундамента массива, 29–30 — ксенолиты. \* — экструзии. АБ — андезибазальт, АН — андезит, ДЦ — дацит, ТРАБ — трахиандезибазальт, ГБ — габбро. Анализы нормированы к 100 %. 5, 8–11, 14, 15, 17–20, 22, 23, 25, 27–30 — образцы из коллекции Г.Б. Флерова; 1–4, 6, 7, 12, 13, 16, 21, 24, 26 — взяты из (Иванов, 2008). Анализы выполнены методом мокрой химии в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

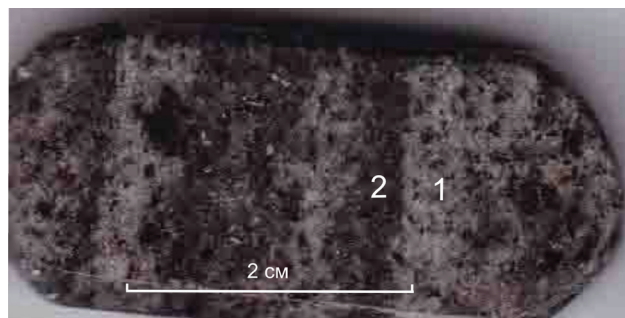
Note. 1–11 — the rocks from the I association, 12–23 — the II association, 24–27 — the III association, 28 — the base-ment of the massif, 29–30 — xenoliths, \* — extrusions. АБ — andesibasalts, АН — andesite, ДЦ — dacite, ТРАБ — tra-chyandesibasalt, ГБ — gabbro. Analysis normalized to 100 %. 5, 8–11, 14, 15, 17–20, 22, 23, 25, 27–30 — samples from the collection of G.B. Fleyrov; 1–4, 6, 7, 12, 13, 16, 21, 24, 26 — are from (Ivanov, 2008). Analyzes were performed by the wet chemistry method at the Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

мегаплагиофировой толщи фундамента, а их лавовые потоки ложатся непосредственно на эти породы, которые представлены обнажениями до 100–150 м видимой мощности.

Андезибазальты ассоциации II, промежуточные по содержанию калия, слагают лавовый поток, который располагается гипсометрически выше по склону и налегает на высоко-К андезибазальты; так же их потоки отмечаются в разрезе постройки Овальной Зимины, где они перемежаются с андезитами ассоциации I. Андезиты ассоциации II встречены в застройке Острой Зимины и в северном секторе вулкана Овальная Зимины и перекрываются потоками андезитов ассоциации I. В разрезе левого борта каньона ледника Желтого снизу вверх наблюдается последовательность отложений лавовых потоков: андезибазальты ассоциации I — высоко-К андезибазальты ассоциации III — андезиты ассоциации II. Андезиты ассоциации I по площади распространения явно доминируют. Их лаво-пирокластические образования слагают разрезы стратовулканов, а лавовые потоки бронируют склоны. В верхней части вулкана Овальная Зимины внутри разреза, сложенного андезитами ассоциации I обнажаются лавовые потоки андезибазальтов ассоциации II и полосчатых лав андезитов разной калиевой щелочности (рис. 4). Андезитовые проявления являются наиболее продолжительными по времени и прослеживаются через всю вулканическую деятельность массива, выраженную терминальными извержениями стратовулканов и побочными прорывами: эруптивный центр Малая Зимины и шлаковые конусы (рис. 2). Заключительная фаза вулканической деятельности массива представлена лавовыми излияниями дацитов из кратера и побочного прорыва вулкана Овальная Зимины, а также экструзиями дацитов и андезитов.

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Составы породообразующих минералов определялись в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН на рентгеновском микроанализаторе «Сamebaх» с установленным энергодисперсионным спектрометром INCA с площадью кристалла 80 мм<sup>2</sup>. Ток в режиме энергодисперсионного спектрометра на эталоне Ni — 20 на, ускоряющее напряжение 20 кВ, экспозиция 15 сек на пике. В качестве эталонов использовались: голубой диопсид (Si, Mg, Ca), синтетический ильменит (Fe, Ti), синтетический фосфат алюминия (Al, P), альбит (Na), ортоклаз (K), синтетическая окись хрома (Cr), родонит (Mn). Исследования проводились в аншлифах пород и в мономинеральных фракциях размером более 0.25 мм,



**Рис. 4.** Полосчатая лава: 1 — андезит ассоциации I; 2 — андезит ассоциации II. Химические составы в точках 1 и 2 соответствуют анализам № 9 и 19 из табл. 1.

**Fig. 4.** Eutaxitic lava: 1 — the I andesite association; 2 — the II andesite association. Chemical compositions at points 1 and 2 correspond to the analyzes № 9 and 19, table 1.

отобранных из протолочных проб весом до 300 г. Метод минеральных выборок привлекался в целях получения статистической информации о минералах вкрапленников, которые редко наблюдались в шлифах. Температура и давление были оценены по составам Срх и Орх с использованием модели из (Putirka, 2008).

#### ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОРОД МАССИВА ЗИМИНЫХ СОПОК

Породы массива представлены стандартной ассоциацией вкрапленников и субфенокристаллов с переменными количественно-минеральными соотношениями: плагиоклаз, который доминирует во всех разновидностях пород, клино- и ортопироксены, титаномagnetит, оливин. Макроструктуры порфиоровые, иногда густо вкрапленные, структуры основной массы от микролитовых до витрофировых. Для основной массы характерны двупироксеновые минеральные ассоциации.

**Андезибазальты ассоциации I.** По соотношению темноцветных минералов обычны двупироксеновые, реже пироксеновые разности. Оливин во вкрапленниках встречается редко, определен в мономинеральной фракции из породы. Размер единичных кристаллов оливина 1–2 мм. Отмечаются гломеропорфиоровые сростки Орх + Срх и сростки состава габбро и норитов.

**Андезиты ассоциации I.** Во всех андезитах среди вкрапленников и субфенокристаллов постоянно присутствуют клинопироксен и ортопироксен. В основных разностях андезитов преобладает моноклинная его разновидность, а оливин встречается не всегда. С повышением кремнекислотности андезитов (и далее к дацитам) в них возрастает роль ортопироксена относительно клинопироксена, оливин крайне редок, появляются вкрапленники амфибола.

Кроме того, в дацитах единично встречены кварц, ильменит, апатит.

**Андезибазальты ассоциации II.** Обычны двупироксеновые породы, встречена двупироксеновая оливинсодержащая разность.

**Андезиты ассоциации II.** Для этих пород типичны двупироксеновые разности с преобладанием клинопироксена над ортопироксеном; в меньшей степени отмечаются клинопироксеновые лавы и редко встречаются двупироксеновые разновидности с оливинном. В одном шлифе двупироксенового андезита обнаружены обломки мегаплаггиофировой породы: в чистом черном стекле вкрапленники Pl (4.5 мм) + Crx (2 мм) + Ol (1.5 мм).

**Андезибазальты ассоциации III.** По содержанию темноцветных минералов вкрапленников и субфенокристаллов породы этой группы представлены оливин-клинопироксеновыми и оливин-двупироксеновыми разновидностями. Отдельные кристаллы оливина и ортопироксена достигают размера 1.5–2 мм. Кроме того, ортопироксен обнаружен как включение в плаггиоклазе, в кайме по оливину, в микролитах основной массы.

### МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ПОРОД МАССИВА ЗИМИНЫХ СОПОК

Минералы из пород массива изучались в аншлифах, и для статистической оценки в моно-

минеральных шашках. Их представительные составы представлены в таблицах 2–5. Выборки пород для анализа подбирались из каждой серии с учетом типичного представителя. В целях простоты изображения корреляционные диаграммы построены для минералов из пород состава андезибазальтов, поскольку они представляют собой «исходные» члены соответствующих дифференцированных серий (рис. 5).

**Оливины.** Статистика массовых определений составов оливинов показывает, что на начальных стадиях кристаллизации значительно более высокой магнезиальностью с  $Fo_{81-83}$  и  $CaO = 0.12-0.23$  мас. % обладают минералы из андезибазальтов ассоциации III по сравнению с андезибазальтами ассоциации I, где оливины представлены  $Fo_{76-80}$ ,  $CaO = 0.10-0.17$  мас. % (рис. 5a). Поля оливинов из андезибазальтов ассоциации I и II сильно пересекаются, тем не менее, в андезибазальтах ассоциации II встречаются единичные более магнезиальные кристаллы  $Fo_{86}$  и  $Fo_{82}$ . В андезитах ассоциации I встречены два корродированных зерна оливина: один состава  $Fo_{82}$  с содержанием  $CaO = 0.11$  мас. % с тонкой каймой  $Fo_{77}$ , другой состава  $Fo_{68}$  с содержанием  $CaO = 0.15$  мас. % с широкой каймой ортопироксена. Оба минерала укладываются в линию регрессии андезибазальтов ассоциации I и, по-видимому, являются их

**Таблица 2.** Представительные составы вкрапленников и субфенокристаллов оливинов (мас.%) из пород массива Зиминых сопков.

**Table 2.** Representative compositions of phenocrysts and subphenocrystals of olivines (wt.%) from rocks of the Ziminy Sopki Volcanic Massif.

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Порода	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АН	АН	АН	АН
SiO <sub>2</sub>	39.29	38.80	38.79	38.73	38.63	38.43	41.13	40.91	40.74	39.95	39.03	37.65
FeO	18.72	19.12	19.79	20.39	20.91	21.32	9.33	9.16	16.83	17.32	21.43	28.23
MnO	0.33	0.34	0.27	0.38	0.34	0.28	0.14	0.14	0.23	0.41	0.35	0.72
MgO	41.99	41.21	40.32	40.87	39.75	39.43	49.62	49.22	44.72	43.37	39.84	33.60
CaO	0.14	0.12	0.17	0.13	0.11	0.13	0.05	0.10	0.12	0.14	0.13	0.16
Sum	100.47	99.59	99.34	100.50	99.74	99.59	100.73	99.89	102.64	101.19	100.78	100.36
Mg#	79.99	79.35	78.41	78.13	77.21	76.73	90.46	90.55	82.57	81.70	76.82	67.97
NiO	—	—	—	—	—	—	0.46	0.36	—	—	—	—
№ п/п	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Порода	АБ	АБ	АН	АН	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	ГРАБ
SiO <sub>2</sub>	39.93	39.47	37.94	37.35	39.14	39.52	38.98	39.20	38.93	40.40	39.15	37.64
FeO	20.06	21.52	24.97	28.30	15.78	16.35	18.80	17.49	17.37	9.47	20.94	24.71
MnO	0.27	0.24	0.40	0.56	0.27	0.27	0.26	0.26	0.29	0.13	0.37	0.46
MgO	40.44	39.48	36.04	33.35	43.53	43.23	40.85	42.69	42.31	48.76	40.02	36.47
CaO	0.12	0.12	0.18	0.22	0.14	0.19	0.18	0.17	0.20	0.15	0.20	0.25
Sum	100.83	100.89	99.53	99.78	98.86	99.56	99.07	99.81	99.10	98.91	100.68	99.53
Mg#	78.23	76.58	72.01	67.75	83.10	82.50	79.48	81.31	81.28	90.18	77.31	72.46

Примечание. Ассоциации: 1–12 — ассоциация I, 13–16 — ассоциация II, 17–23 — ассоциация III, 24 — фундамент массива. Названия пород те же, что в табл. 1.

Note. Associations: 1–12 — the I association, 13–16 — the II association, 17–23 — the III association, 24 — the massif's basement. The rocks are the same as in table 1.

ВУЛКАНИЧЕСКИЙ МАССИВ ЗИМИНЫХ СОПОК

**Таблица 3.** Представительные составы вкрапленников и субфенокристаллов клинопироксенов (мас.%) из пород массива Зиминых сопок.

**Table 3.** Representative compositions of phenocrysts and subphenocrysts of clinopyroxenes (wt.%) from the Ziminy Sopki Volcanic Massif.

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Порода	АБ	АБ	АБ	АБ*	АБ**	АБ***	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АН	АН
SiO <sub>2</sub>	53.85	52.65	52.79	52.40	53.04	54.02	51.25	51.16	52.15	51.57	52.46	52.45	52.04
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.35	0.34	0.50	0.52	0.23	0.43	0.58	0.48	0.40	0.22	0.42	0.47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.10	1.96	1.66	3.28	1.55	1.97	2.27	2.82	2.45	2.08	1.54	1.80	1.35
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.76	0.25	0.00	0.00	0.00	0.43	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO*	4.27	6.36	10.56	7.30	11.08	5.97	7.49	8.53	8.63	8.21	7.86	8.80	9.66
MnO	0.17	0.27	0.35	0.18	0.33	0.00	0.23	0.23	0.38	0.32	0.37	0.40	0.49
MgO	18.93	17.51	16.95	16.49	16.52	18.16	16.18	15.86	16.36	14.85	16.04	15.13	14.45
CaO	20.06	19.38	16.73	20.68	17.44	19.89	19.35	19.45	19.45	20.83	20.36	20.35	20.07
Na <sub>2</sub> O	0.21	0.28	0.32	0.23	0.34	0.36	0.25	0.34	0.21	0.36	0.30	0.34	0.51
Sum	99.35	99.01	99.70	101.06	100.82	101.03	97.63	98.97	100.11	98.62	99.15	99.69	99.04
Mg#	88.77	83.07	74.10	80.11	72.66	84.43	79.38	76.82	77.16	76.33	78.44	75.40	72.73
En	52.96	50.02	48.57	46.52	46.84	50.72	47.19	45.81	46.50	43.13	45.72	43.61	42.14
Fs	6.70	10.19	16.98	11.55	17.62	9.35	12.25	13.82	13.76	13.38	12.57	14.23	15.80
Woll	40.34	39.79	34.46	41.93	35.54	39.93	40.56	40.37	39.74	43.49	41.71	42.16	42.06
№ п/п	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Порода	АН	АН	АН	АН	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АН	АН	АН	АН
SiO <sub>2</sub>	53.41	51.85	51.88	51.62	51.80	51.34	51.33	51.92	51.55	49.79	53.21	53.45	51.52
TiO <sub>2</sub>	0.27	0.45	0.52	0.60	0.30	0.50	0.59	0.64	0.49	0.68	0.41	0.32	0.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.41	2.88	3.51	1.66	3.67	2.82	2.29	2.09	1.97	2.72	2.45	1.74	3.10
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.74	0.34	0.15
FeO*	6.89	6.83	8.36	11.21	6.56	9.25	9.95	10.76	10.65	12.92	6.63	6.80	7.18
MnO	0.25	0.25	0.29	0.45	0.20	0.30	0.32	0.36	0.41	0.31	0.24	0.26	0.25
MgO	18.08	16.44	16.37	13.24	16.48	14.99	15.24	15.57	14.75	13.89	17.82	17.72	15.61
CaO	19.12	20.68	19.04	20.35	19.83	19.62	17.91	17.64	19.02	15.82	19.21	19.33	20.60
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.28	0.31	0.32	0.38	0.32	0.39	0.29	0.26	0.53	0.31	0.31	0.36
Sum	99.43	99.66	100.28	99.45	99.38	99.14	98.02	99.27	99.10	96.66	101.02	100.27	99.27
Mg#	82.39	81.10	77.73	67.80	81.75	74.28	73.19	72.06	71.17	65.71	82.73	82.29	79.49
En	50.66	46.79	47.12	38.76	47.89	43.73	45.23	45.41	42.88	42.73	50.42	50.02	45.32
Fs	10.83	10.91	13.50	18.41	10.69	15.14	16.57	17.61	17.37	22.30	10.52	10.77	11.69
Woll	38.51	42.30	39.39	42.82	41.42	41.14	38.20	36.98	39.75	34.98	39.06	39.22	42.99
№ п/п	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Порода	АН	АН	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	ТРАБ
SiO <sub>2</sub>	51.22	50.01	51.22	50.38	50.36	51.45	51.55	51.77	52.17	51.03	52.23	51.74	51.46
TiO <sub>2</sub>	0.67	0.71	0.66	0.76	0.63	0.64	0.67	0.74	0.43	0.47	0.33	0.53	0.78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.83	4.27	2.85	3.37	4.38	2.23	1.90	1.86	2.20	3.23	2.21	6.98	2.58
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.48	0.00	0.00	0.00	0.18	0.95	0.58	0.85	0.00
FeO*	8.71	8.63	8.25	9.15	6.97	10.30	10.90	11.16	6.33	5.19	5.22	2.58	10.58
MnO	0.32	0.21	0.25	0.21	0.17	0.26	0.34	0.39	0.17	0.18	0.15	0.00	0.36
MgO	15.91	14.48	15.79	15.43	15.75	15.57	15.13	15.74	16.54	16.34	16.68	15.34	15.99
CaO	19.08	20.42	19.94	19.52	20.28	18.71	18.61	18.04	20.86	21.17	21.24	19.87	18.00
Na <sub>2</sub> O	0.34	0.43	0.32	0.33	0.30	0.35	0.32	0.32	0.25	0.27	0.20	1.76	0.37
Sum	99.08	99.16	99.28	99.15	99.32	99.51	99.42	100.02	99.13	98.83	98.84	99.65	100.12
Mg#	76.50	74.94	77.33	75.04	80.11	72.93	71.22	71.54	82.33	84.88	85.07	91.38	72.93
En	46.10	42.59	45.44	44.60	42.64	44.75	43.70	45.01	47.14	47.41	47.83	49.37	45.87
Fs	14.16	14.24	13.32	14.84	19.15	16.61	17.66	17.90	10.12	8.45	8.40	4.66	17.02
Woll	39.74	43.17	40.56	38.21	38.65	38.63	37.08	42.98	42.73	44.15	43.77	45.97	37.11

Примечание. Ассоциации: 1–17 — ассоциация I, 18–28 — ассоциация II, 29–38 — ассоциация III, 39 — фундамент массива. Названия пород те же, что в табл. 1. Зональный кристалл: \* центр кристалла, \*\* промежуточная зона, \*\*\* край.

Note. Associations: 1–17 — the I association, 18–28 — the II association, 29–38 — the III association, 39 — the basement of the massif. The rocks are the same as in table 1. Zoned crystal: \* the center of the crystal, \*\* intermediate zone, \*\*\* the edge.

**Таблица 4.** Представительные составы вкрапленников и субфенокристаллов ортопироксенов (мас.%) из пород массива Зиминых сопок.**Table 4.** Representative compositions of phenocrysts and subphenocrystals of orthopyroxenes (wt.%) from rocks of the Ziminy Sopki Volcanic Massif.

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Порода	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АН	АН_	АН	АБ	АБ	АБ
SiO <sub>2</sub>	56.02	54.62	54.19	52.58	53.19	53.57	54.38	55.09	52.22	53.48	52.79	54.40	53.08
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.17	0.30	0.17	0.33	0.34	0.00	0.17	0.29	0.30	0.27	0.26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.30	1.71	5.22	0.99	0.74	1.77	1.32	0.93	1.99	1.26	1.30	1.43	1.72
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.18	0.00	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	10.70	12.05	5.80	22.17	21.60	17.02	14.74	14.25	18.69	16.22	22.10	15.76	20.29
MnO	0.26	0.33	0.00	0.77	0.86	0.58	0.42	0.38	0.69	0.53	0.74	0.43	0.64
MgO	30.16	28.62	32.41	21.84	22.12	25.22	26.86	27.07	23.18	25.64	21.82	26.36	22.69
CaO	1.74	1.65	0.76	1.29	1.28	1.67	1.85	1.66	1.39	1.60	1.85	2.23	1.72
Сумма	100.36	98.98	99.03	99.94	99.96	100.16	99.91	99.38	98.33	99.02	100.90	100.88	100.40
Mg#	83.40	80.89	90.88	63.72	64.61	72.54	76.46	77.20	68.85	73.81	63.77	74.88	66.59
En	80.61	78.27	89.51	62.04	62.92	70.12	73.67	74.66	66.87	71.44	61.38	71.62	64.26
Fs	16.04	18.49	8.99	35.33	34.47	26.55	22.68	22.05	30.25	25.35	34.88	24.02	32.24
Woll	3.34	3.24	1.51	2.63	2.62	3.34	3.65	3.29	2.88	3.20	3.74	4.35	3.50
№ п/п	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Порода	АБ	АН	АН	АН	АН	АН	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	ТРАБ	ТРАБ
SiO <sub>2</sub>	51.58	54.29	55.08	54.07	52.95	53.45	53.69	53.04	52.74	53.03	52.51	54.14	53.22
TiO <sub>2</sub>	0.26	0.20	0.23	0.29	0.19	0.26	0.39	0.32	0.43	0.37	0.41	0.34	0.40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.36	1.41	1.41	0.77	1.15	1.48	1.06	0.86	1.19	0.95	1.05	1.38	1.38
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.43	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	21.11	10.76	12.01	17.13	16.41	16.72	18.03	20.05	17.83	18.97	20.22	17.10	15.74
MnO	0.70	0.22	0.29	0.44	0.48	0.38	0.54	0.60	0.45	0.52	0.55	0.46	0.39
MgO	21.52	29.29	28.45	24.62	25.31	25.38	24.29	22.48	23.95	23.44	22.52	25.57	25.63
CaO	1.61	1.66	2.25	2.11	1.49	1.54	2.09	1.88	1.91	2.10	2.07	2.19	2.13
Сумма	99.14	98.26	99.86	99.43	97.98	99.21	100.09	99.23	98.50	99.38	99.33	101.18	98.89
Mg#	64.50	82.91	80.85	71.93	73.33	73.02	70.60	66.65	70.54	68.78	66.50	72.72	74.38
En	62.34	80.20	77.30	68.87	71.12	70.76	67.65	64.08	67.80	65.86	63.70	69.60	71.21
Fs	34.31	16.53	18.31	26.88	25.87	26.15	28.17	32.06	28.32	29.90	32.09	26.11	24.53
Woll	3.35	3.27	4.39	4.24	3.01	3.09	4.18	3.85	3.89	4.24	4.21	4.28	4.25

Примечание. Ассоциации: 1–10 — ассоциация I, 11–19 — ассоциация II, 20–24 — ассоциация III, 25, 26 — фундамент массива. Названия пород те же, что в табл. 1.

Note. Associations: 1–10 — the I association, 11–19 — the II association, 20–24 — the III association, 25, 26 — the basement of the massif. The rocks are as in table 1.

наследниками. Оливины из андезитов ассоциации I встречаются только в мономинеральной фракции, их составы лежат в интервале Fo<sub>72-67</sub>.

Особо выделяется дискретная группа высокомагнезиальных оливинов состава Fo<sub>90</sub> с высоким содержанием никеля (0.36–0.46%) и пониженным CaO (0.05–0.15%), обнаруженных в минеральных фракциях (7 зерен в средне-К андезибазальтах ассоциации I, 1 зерно в андезибазальтах ассоциации III). Оливины из трахиандезибазальтов фундамента слагают свою обособленную компактную группу с низкой

магнезиальностью (Fo<sub>71-72</sub>) и повышенным содержанием CaO (до 0.29 мас.%).

**Клинопироксены.** Вкрапленники и субфенокристаллы из пород ассоциации I характеризуются наиболее широким диапазоном минеральных видов и представлены авгитом, который всегда доминирует, диопсидом, эндиопсидом, салитом. Кроме того в андезибазальтах ассоциации I встречается в субфенокристаллах пижонит. В то же время минералы из андезибазальтов ассоциации III — это преимущественно авгиты, а диопсиды и салиты встречаются в малой степени (рис. 5а). Микролиты последовательно прод-



ВУЛКАНИЧЕСКИЙ МАССИВ ЗИМИНЫХ СОПОК

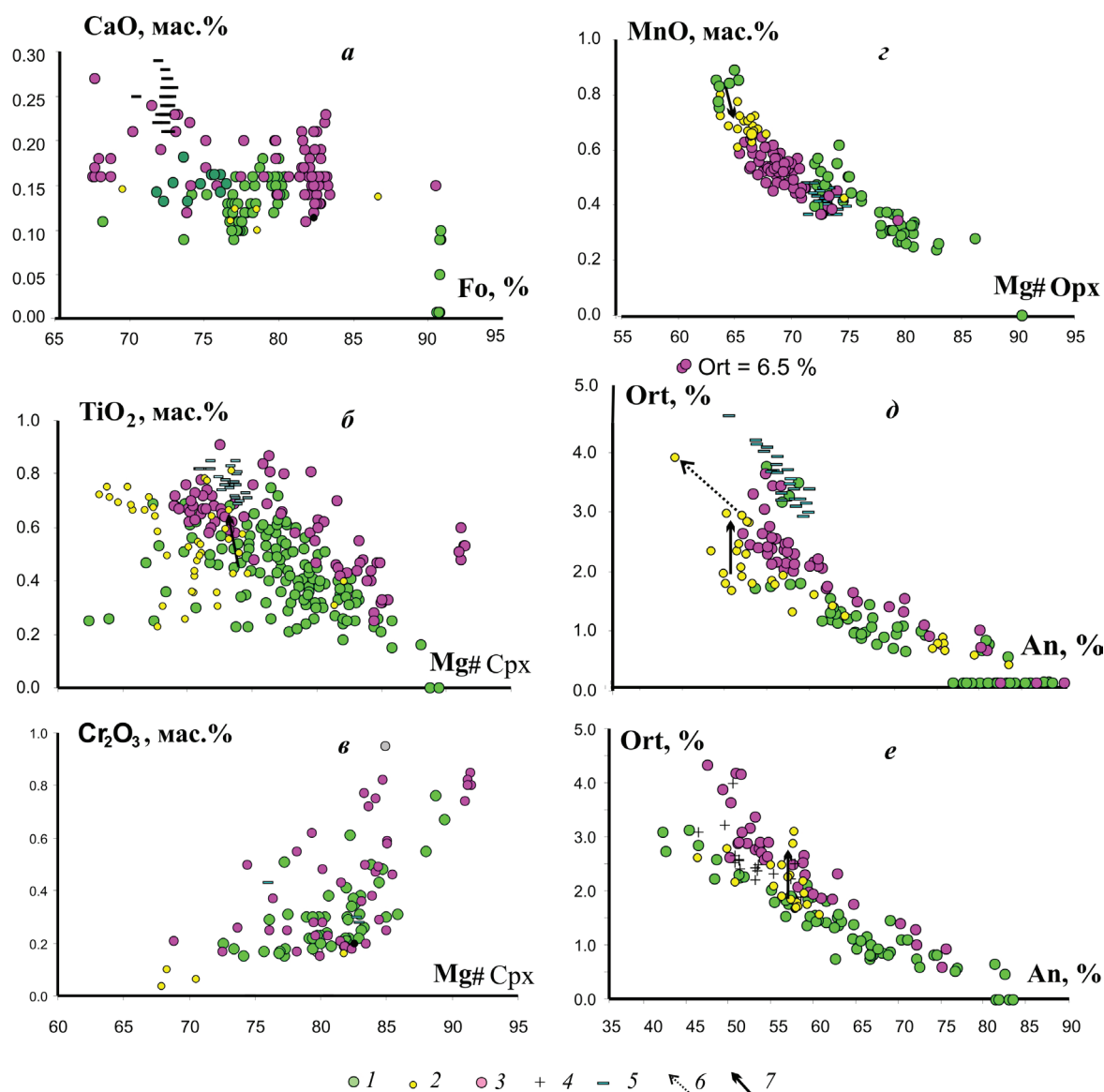
**Таблица 5.** Представительные составы вкрапленников и субфенокристаллов плагиоклазов (мас. %) из пород массива Зиминых сопок.

**Table 5.** Representative compositions of phenocrysts and subphenocrysts of plagioclases (wt.%) from rocks of the Ziminy Sopki Volcanic Massif.

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Порода	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АН	АН	АН	АН
SiO <sub>2</sub>	47.02	47.33	47.88	49.52	46.56	50.85	51.58	55.06	53.54	49.04	53.58	55.19	56.66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33.10	32.79	32.23	31.22	33.77	30.14	29.84	27.65	28.17	32.64	28.91	27.94	26.44
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.81	0.72	0.67	0.56	0.68	0.78	0.91	1.13	0.87	0.88	0.31	0.23	0.28
CaO	16.74	16.33	15.71	14.53	17.34	13.99	13.50	12.09	11.63	15.94	11.65	10.41	9.02
Na <sub>2</sub> O	1.87	2.12	2.48	3.18	1.68	3.55	3.86	4.03	4.68	2.62	4.91	5.54	6.34
K <sub>2</sub> O	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.13	0.14	0.19	0.28	0.09	0.19	0.23	0.40
Сумма	99.54	99.40	98.97	99.01	100.03	99.70	100.04	100.28	99.17	101.21	99.55	99.54	99.14
Ab	16.82	18.90	22.22	28.37	14.92	31.23	33.82	37.19	41.45	22.81	42.80	48.41	54.71
An	83.18	80.45	77.78	71.63	85.08	68.02	65.37	61.66	56.92	76.68	56.11	50.27	43.02
Ort	0.00	0.65	0.00	0.00	0.00	0.75	0.81	1.15	1.63	0.52	1.09	1.32	2.27
№ п/п	14	15	16	17	18	19*	20**	21	22	23	24	25	26
Порода	АН	АН	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АН	АН	АН	АН
SiO <sub>2</sub>	50.20	51.12	49.15	52.99	55.48	54.29	56.71	47.24	56.34	54.48	54.48	57.02	49.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30.49	29.91	31.98	29.50	27.53	27.96	26.17	33.15	26.53	28.34	28.34	26.66	32.63
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.54	0.41	0.68	0.80	0.71	0.72	0.81	0.50	0.81	1.01	1.01	0.76	0.66
CaO	14.02	12.93	15.05	12.18	10.43	10.52	8.85	16.57	9.60	11.70	11.70	9.53	15.78
Na <sub>2</sub> O	3.40	3.87	2.80	4.39	5.33	5.06	6.00	2.04	5.61	4.90	4.90	5.54	2.64
K <sub>2</sub> O	0.18	0.20	0.11	0.25	0.33	0.45	0.64	0.05	0.46	0.39	0.39	0.57	0.11
Сумма	98.83	98.44	99.77	100.26	99.81	99.00	99.18	99.55	99.35	100.82	100.82	100.08	100.83
Ab	30.18	34.72	25.02	38.90	47.12	45.30	53.04	1.82	5.00	42.16	42.16	4.95	23.09
An	68.77	64.10	74.33	59.64	50.96	52.05	43.24	81.54	47.29	55.63	55.63	47.10	76.28
Ort	1.05	1.18	0.65	1.46	1.92	2.65	3.72	0.29	2.70	2.21	2.21	3.35	0.63
№ п/п	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Порода	АН	АН	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	ТРАБ	ТРАБ
SiO <sub>2</sub>	50.15	54.95	45.67	45.74	54.08	55.22	47.81	49.14	47.31	57.13	51.37	53.14	54.31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30.60	27.60	34.40	33.22	28.27	27.37	32.29	30.57	32.71	25.50	29.14	28.00	27.97
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.98	0.89	0.69	0.64	1.07	1.52	0.82	1.03	0.89	1.42	1.43	1.03	0.89
CaO	14.38	11.20	18.01	17.27	11.85	11.00	16.19	14.54	16.09	8.94	12.75	11.68	11.07
Na <sub>2</sub> O	3.02	5.13	1.18	1.54	4.62	5.13	2.15	2.90	2.21	5.31	3.75	4.47	4.76
K <sub>2</sub> O	0.21	0.64	0.00	0.00	0.37	0.55	0.09	0.16	0.15	1.13	0.25	0.55	0.67
Сумма	100.02	100.56	99.95	98.41	100.43	101.02	99.35	98.51	99.36	99.89	98.88	99.04	99.67
Ab	27.20	43.69	10.60	13.89	40.48	44.34	19.27	26.27	19.73	48.30	34.21	39.60	42.06
An	71.56	52.72	89.40	86.11	57.38	52.54	80.20	72.78	79.39	44.94	64.29	57.19	54.05
Ort	1.24	3.59	0.00	0.00	2.13	3.13	0.53	0.95	0.88	6.76	1.50	3.21	3.89

Примечание. Ассоциации: 1–15 — ассоциация I, 16–28 — ассоциация II, 29–37 — ассоциация III, 38–39 — фундамент массива. Названия пород те же, что в табл. 1. Зональный кристалл: \* включение кристалл-узник, \*\* кристалл-хозяин.

Note. Associations: 1–15 — the I association, 16–28 — the II association, 29–37 — the III association, 38–39 — the basement of the massif. The rocks are as in table 1. Zonal crystal: \* inclusion crystal-captive, \*\* host crystal.



**Рис. 5.** Вариационные диаграммы составов минералов из пород массива Зиминых сопки: *a–d* — вкрапленники и субфенокристаллы из андезитобазальтов: оливины (*a*), клинопироксены (*b*, *в*), ортопироксены (*г*), плагиоклазы (*д*); *e* — микролиты плагиоклаза. Минералы из пород ассоциаций: 1 — ассоциации I; 2 — ассоциации II; 3 — ассоциации III; 4 — из андезитов ассоциации III; 5 — из трахиандезитобазальтов фундамента; 6 — тренд изменения состава плагиоклаза включение — минерал-хозяин; 7 — ортогональный тренд повышения калиевой щелочности пород.

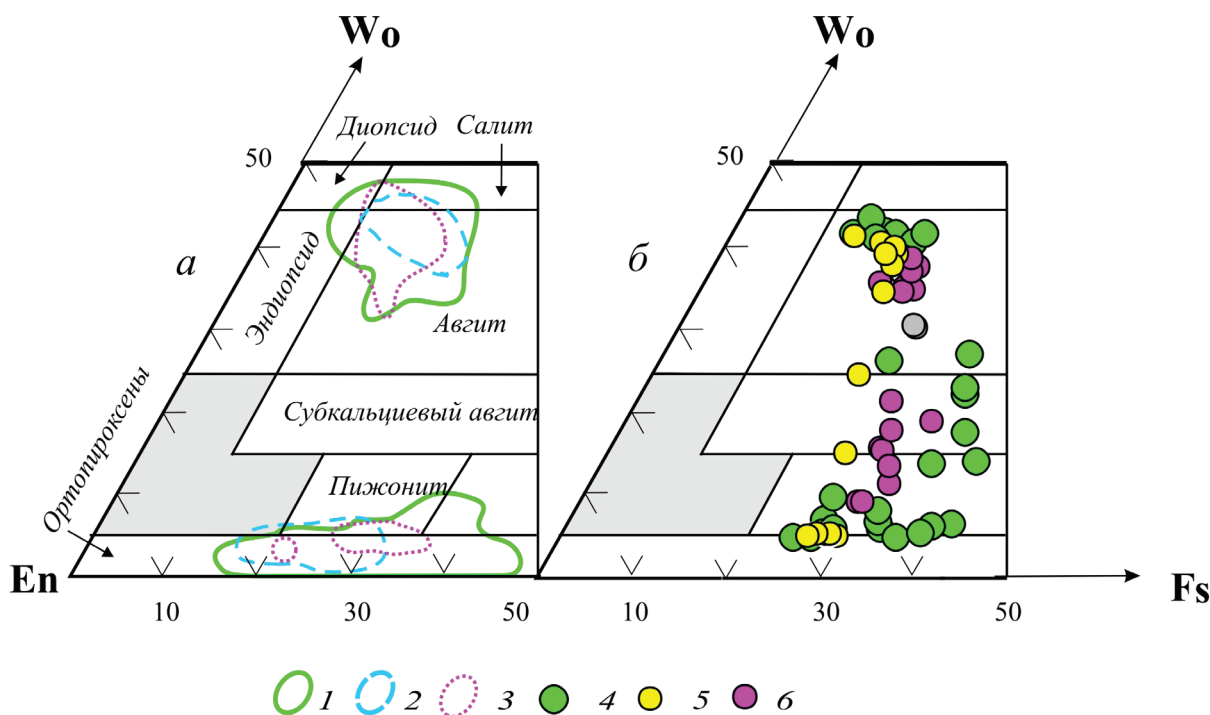
**Fig. 5.** The minerals compositions variational diagrams for rocks of the Ziminy Sopki Volcanic Massif: *a–d* — phenocrysts and sub-phenocrysts from andesite-basalts: olivines (*a*), clinopyroxenes (*b*, *в*), orthopyroxenes (*г*), plagioclases (*д*); *e* — microlites of plagioclase. Minerals from rock associations: 1 — the I association; 2 — the II association; 3 — the III association; 4 — from andesites of the III association 5 — from the trachyandesitebasalts' basement; 6 — the composition alteration trend plagioclase inclusion — host-mineral; 7 — the increasing potassium alkalinity of rocks orthogonal trend.

левают кристаллизационные ряды минералов вкрапленников до пижонитов, при этом микролиты клинопироксенов из пород ассоциации I более железистые в областях субкальциевого авгита и пижонитов в сравнении с таковыми из более щелочных пород (рис. 6б).

Распределение клинопироксенов по составам представлено довольно сложной картиной. С одной стороны клинопироксены из андезитобазальтов ассоциации I обнаруживают типичную

тенденцию уменьшения магнезиальности в кристаллизационном ряду, с другой стороны отмечаются многочисленные кристаллы с обратной и порой повторяющейся зональностью с существенной разницей магнезиального номера, в отдельных случаях достигающей 12 единиц разных по составам зон.

Статистика распределения фигуративных точек предполагает начало массовой кристаллизации Cpx в андезитобазальтах ассоциации I



**Рис. 6.** Классификационная диаграмма En — Wo — Fs для пироксенов из андезибазальтов массива Зиминых сопки: *a* — для вкрапленников и субфенокристаллов, *б* — для микролитов. 1–3 — поля составов минералов из пород: 1 — ассоциации I, 2 — ассоциации II, 3 — ассоциации III. 4–6 — минералы из пород ассоциаций: 4 — ассоциации I, 5 — ассоциации II, 6 — ассоциации III. Дискриминационные диаграммы построены по (Poldervaart, Hess, 1951).

**Fig. 6.** Classification En — Wo — Fs diagram for pyroxenes from the Ziminy Sopki Volcanic Massif's andesite-basalts: *a* — for phenocrysts and subphenocrystals, *б* — for microlites. 1–3 — compositional fields for mineral from rocks: 1 — the I association, 2 — the II association, 3 — the III association. 4–6 — minerals from rocks' associations: 4 — the I association, 5 — the II association, 6 — the III association. The discriminatory lines data is from (Poldervaart, Hess, 1951).

и ассоциации III в интервале Mg# — 83–85. Составы клинопироксенов из андезибазальтов ассоциации II в основном соответствуют ассоциации I и продлевают кристаллизационный ряд таковых ассоциации I в интервале Mg# — 75–63. В то же время, отмечается смещение фигуративных точек клинопироксенов с Mg# — 72–73 в область составов андезибазальтов ассоциации III, тем самым создавая ортогональный тренд с тенденцией увеличения в них содержания TiO<sub>2</sub> (рис. 5б).

Среди пироксенов по содержанию хрома выделяется две дискретные группы: клинопироксены, в которых содержание хрома оказалось ниже предела обнаружения, и хромсодержащие авгиты и диопсиды. В целом, при широкой вариации фигуративных точек содержание Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в последних находится в прямой корреляционной зависимости от Mg# Crx в интервале 0.17–0.95 мас.% и уменьшается в ходе кристаллизации (рис. 5в).

Типичный представитель кристаллов клинопироксенов с повторяющейся зональностью изображен на рис. 6а. В кристалле отчетливо видны три зоны роста от центральной к периферийной, которые отвечают составам соот-

ветственно: Mg#Crx = 85.84 — 74.13 — 83.28, содержания (мас.%) Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 0.22 — 0.00 — 0.25 и TiO<sub>2</sub> = 0.25 — 0.54 — 0.35. Более того, встречаются микролиты с Mg# — 81 и 83, с содержанием в последнем Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 0.23 мас.%. Учитывая то, что вектор, отражающий устойчивую тенденцию обратной зональности пироксенов, выраженную в повышении Mg# и понижении TiO<sub>2</sub>, прямо прослеживается к фигуративным точкам высокомагнезиальных клинопироксенов первых фаз кристаллизационного ряда, их появление, вероятно, связано с инъекцией в камеру исходной андезибазальтовой магмы.

При просмотре аншлифов андезибазальтов ассоциации I встречаются несколько зональных кристаллов размером 1–2 мм хороших кристаллографических форм, в которых отчетливо выделяется корродированное ядро клинопироксена состава Mg# = 88–89.4 с содержанием Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 0.7–0.75 мас.% и TiO<sub>2</sub> ниже предела обнаружения. Периферическая зона таких кристаллов представлена клинопироксеном с Mg# = 79.7 при содержании Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 0.23 и TiO<sub>2</sub> = 0.26–0.30 мас.% (рис. 6б). Вероятно, такие ядра в клинопироксенах представляют собой самую первую фазу кристаллизации мате-

ринской магмы, связанную с общим трендом составов минералов исследованных пород. В минеральной фракции высоко-К андезибазальта ассоциации III так же обнаружена группа зерен состава  $Mg\# Crx = 91$  с содержанием  $TiO_2 = 0.48-0.60$  мас.% и  $Cr_2O_3 = 0.74-0.85$  мас.%, которые занимают резко дискретную позицию на рис. 5б.

**Ортопироксены.** Все ортопироксены массива Зиминых сопки относятся к ряду бронзит — гиперстен, при этом наиболее широкий спектр составов характерен для пород ассоциации I (рис. 5а). Минералы из андезибазальтов ассоциации I и III слагают линейно вытянутые параллельные тренды обратной корреляции на диаграмме зависимости  $MnO$  от  $Mg\#Orx$  (рис. 4з). При этом ортопироксены из пород ассоциации I отличаются повышенным содержанием  $MnO$  и более высокой  $Mg\#Orx$  относительно минералов из пород всех других ассоциаций (рис. 5з). Интервалы магнезиальности  $Mg\# Orx$ : из андезибазальтов ассоциации I — 86–58, из андезибазальтов ассоциации III — 71–65. Лишь один кристалл последних попадает в поле составов андезибазальтов. Резко дискретно располагается энстатит с  $Mg\# = 90.88$ , обнаруженный в минеральной фракции андезибазальта ассоциации I. Поскольку его положение соответствует линии регрессии минералов ассоциации I, можно лишь предположить, что, равно как и в случае клинопироксенов, он отражает фазу кристаллизации материнского расплава. Ортопироксены из андезибазальтов ассоциации II занимают промежуточное положение с интервалом  $Mg\# = 67-64$ , образуя мостик между таковыми из пород ассоциаций I и III. Смещение отдельных фигуративных точек минералов пород в поле минералов из фундамента, по-видимому, связано с захватом минералов фундамента в процессе извержений стратовулкана (рис. 5з).

**Полевые шпаты.** Вкрапленники и субфенокристаллы из всех пород представлены Ca-Na плагиоклазом состава от битовнита до андезина (рис. 5д). Интервалы кристаллизации плагиоклазов по содержанию анортитового минала из андезибазальтов всех серий практически совпадают и определяются диапазоном  $An (\%) = 88-50$ ; в минеральной фракции из андезибазальта ассоциации III встречено единичное зерно битовнита с содержанием  $An_{89.4}$ .

Характер распределения фигуративных точек андезибазальтов ассоциации I на диаграмме зависимости ортоклазовой компоненты от анортитового минала линейный, с хорошо выраженной отрицательной корреляцией с интервалом массовой кристаллизации плагиоклаза состава  $An_{69-61}$ ,  $Ort_{0.6-1.3}$ . Интервал массовой кристаллизации андезибазальтов ассоци-

ации III —  $An_{60-52}$ ,  $Ort_{2.0-2.3}$ , а их линия регрессии заметно изгибается в области лабрадора  $An_{51-57}$  с тенденцией к повышению содержания  $Ort$  минала от 1.5 до 3.1%. Кроме того в минеральной фракции породы ассоциации III встречены два зерна с содержанием  $An_{44.6}$  и  $Ort_{6.5}$  (рис. 5д).

Распределение точек составов плагиоклазов из андезибазальтов ассоциации II неоднозначно и выражается наличием разно направленных трендов. В одном случае, мы имеем линию регрессии, совпадающую с линейным трендом всех андезибазальтов в интервале  $An_{82.8-49}$ ; в другом случае, в области  $An_{50}$  отчетливо формируется ортогональный тренд с резким повышением ортоклазового минала в область составов плагиоклазов пород ассоциации III. Тенденция повышения содержания ортоклазового минала в андезибазальтах ассоциации II наглядно иллюстрируется рис. 6в, на котором представлен кристалл андезина состава  $Ab_{53.04}An_{43.24}Ort_{3.72}$ , включающий плагиоклаз более ранней фазы кристаллизации состава лабрадора  $Ab_{45.30}An_{52.05}Ort_{2.65}$  (табл. 5, № п/п 19, 20). Нам представляется, что это свидетельствует об изменении условий кристаллизации плагиоклаза в связи с повышением калиевой щелочности среды. Вкрапленники из трахиандезибазальта фундамента слагают обособленную дискретную группу состава лабрадора с максимальной щелочностью, а наличие в этом поле минералов из пород других серий вполне объяснимо захватом магмами соответствующих серий минералов фундамента в процессе извержения.

Микролиты закономерно дополняют тенденции эволюции составов вкрапленников, сохраняя различия по щелочности минералов: по содержанию ортоклазового минала микролиты из пород ассоциации I занимают самую низкую позицию; тренд ортоклазового минала в минералах из андезибазальтов ассоциации III круто возрастает. Микролиты из андезибазальтов ассоциации II располагаются в поле андезибазальтов ассоциации I и занимают промежуточную позицию между таковыми из ассоциаций I и III. Равно как и на графике для вкрапленников, они образуют ортогональный тренд с вектором в поле составов плагиоклазов андезибазальтов ассоциации III с ростом содержания ортоклазового минала до 3% в интервале  $An_{56-48}$  (рис. 5е).

**Шпинелиды.** Для всех пород типичны титаномагнетиты с незначительными вариациями содержания (мас. %):  $TiO_2 = 7-15$  мас.% и  $Cr_2O_3 = 0.15$  до 3.7. В минеральной фракции андезибазальта ассоциации III встречены 2 зерна оливина состава  $Fo_{68}$  с включением хромпикотита с содержанием  $Cr_2O_3 = 22.47$  и 30.94 мас.%, который, вероятно, представляет фазу материнского расплава.

**Амфиболы.** Изученные вкрапленники амфиболов из андезитов и дацитов ассоциации I относятся к группе паргасита, а обнаруженный микролит из андезибазальта ассоциации III к группе тремолита.

Несмотря на значительные перекрытия полей распределения фигуративных точек минералов из пород серий разной калиевой щелочности, различия в их составах достаточно выразительны, а эволюция составов минералов в кристаллизационных рядах выражена типичной для них тенденцией. В целом по содержанию элементов составы минералов из высоко-К андезибазальтов ассоциации III по сравнению с таковыми из пород ассоциации I слагают тренды с повышенными содержаниями CaO в оливинах, TiO<sub>2</sub> в клинопироксенах, K<sub>2</sub>O в плагиоклазах и с пониженными содержаниями MnO в ортопироксенах.

Сделаны расчеты РТ условий кристаллизации парагенезиса вкрапленников Сrx + Орх (табл. 6). Для расчетов № 1–9 брались минеральные пары, обнаруженные в аншлифе. Примечательно то, что в одной шашке андезибазальта ассоциации I (табл. 6, № п/п 2 и 3) встречены парагенезисы с разными РТ параметрами. Расчеты для № 10 выполнены по высокомагнезиальным пироксенам, которые занимают резко дискретную позицию (рис. 4): Сrx ядра кристалла и равновесный с ним Орх из минеральной фракции (рис. 4б, 4г, 6б). Вариации полученных значений и, в частности, в одном образце свидетельствуют о неравновесности ряда минералов с расплавом, чему способствовала контаминация дочерних

магм в процессе кристаллизации с захватом не свойственных им минеральных фаз.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты петрохимических исследований пород массива Зиминых сопков, представленные в работах (Чурикова и др., 2018; Churikova et al., 2018) и отраженные на рис. 2 показывают, что среди вулканитов получили развитие вулканические ассоциации, которые включают породы разной калиевой щелочности со своими трендами. Различия пород выделенных серий находят свое отражение и в описанных минеральных ассоциациях соответствующих серий. В целом, оливины, клинопироксены, ортопироксены и плагиоклазы значительно отличаются как по составам, так и по трендам их кристаллизационных рядов. Частичные перекрытия полей составов минералов из пород разных серий вполне естественны, поскольку магмы поступали, чередуясь во времени или субодновременно, что способствовало их контаминации. Ярким примером контаминации нам представляется проявление обратной и повторяющейся зональности клинопироксенов из пород ассоциации I с протяженным изменением Mg# к краевым зонам, а так же сосуществование в одной породе равновесных парагенезисов Сrx + Орх с различными РТ параметрами условий кристаллизации (табл. 6). На наш взгляд это связано с поступлением в магматический очаг в процессе кристаллизации андезибазальтовой магмы новых порций расплава.

Наличие клинопироксенов с Mg# = 88–89 в ядрах зональных кристаллов свидетельствует о том, что эти ядра кристаллизовались в существенно более высоких РТ условиях относительно типоморфных клинопироксенов андезибазальтов ассоциации I (рис. 6б). Нам представляется, что такие клинопироксены и аналогично с ними вся группа минералов ассоциации I (ортопироксены, плагиоклазы, оливины, хромпикотиты), которые характеризуются примитивными близмантийными составами и занимают резко дискретную позицию (рис. 5), могут представлять собой фазы кристаллизации первичного родительского глубинного базальтового расплава в очаге, продуцирующем дочерние андезибазальты в коровую область. Расчеты РТ условий кристаллизации по методу, описанному в работе (Putirka, 2008) для таких пар Сrx + Орх из андезибазальтов ассоциации I показали значения T°C = 1102, P кбар = 9 (табл. 6), что соответствует глубине расположения очага материнской магмы порядка 33 км, т.е. в пределах верхней мантии.

**Таблица 6.** РТ условия кристаллизации пород из массива Зиминых сопков.

**Table 6.** РТ conditions of rocks crystallization from the Ziminy Sopki Volcanic Massif.

№ п/п	Породы	Ассоциация	T°C	P кбар
1	Андезибазальт	I	1097	4.4
2	Андезибазальт	I	1020	2.8
3	Андезибазальт	I	1053	5.0
4	Андезибазальт	I	1054	4.1
5	Андезит	I	964	3.5
6	Андезибазальт	II	1028	3.6
7	Андезит	II	1066	3.2
8	Андезибазальт	III	1013	6
9	Андезибазальт	III	1035	5.4
10	Андезибазальт	I	1102	9

Примечание. Расчеты РТ параметров по (Putirka, 2008).

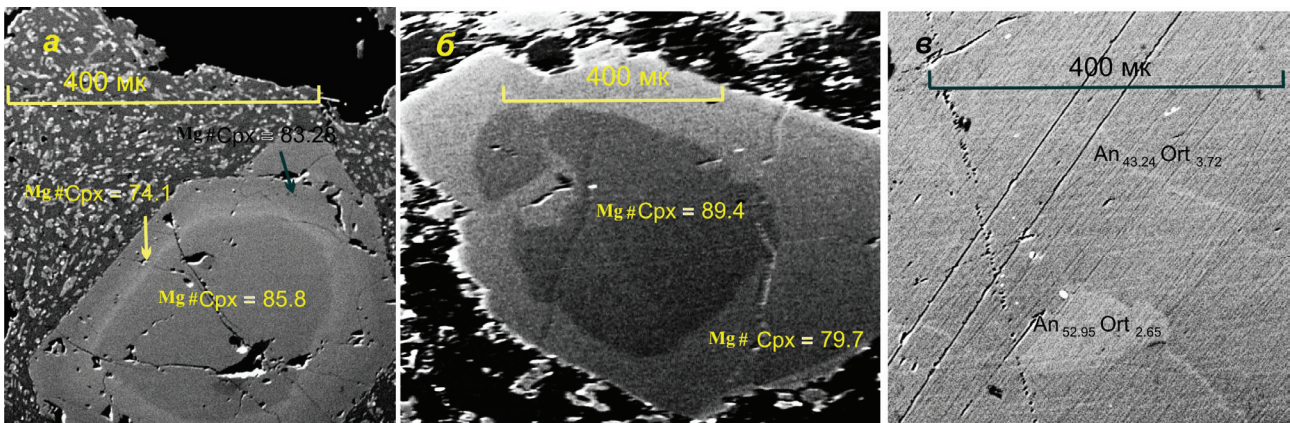
Note. The РТ parameters estimations were made using the data from (Putirka, 2008).

Сосуществование разных по составу магм, участвовавших в вулканической деятельности формирующей массив Зиминых сопки и извергающихся из одного эруптивного центра, может свидетельствовать об их парагенетичности. При этом, петрографические и минералогические данные свидетельствуют о наличии нескольких процессов, включая фракционную кристаллизацию, контаминацию/смешение магм разного состава и разноглубинного генезиса. Относительная дискретность ассоциаций вулканитов с субпараллельными линиями регрессии предполагает определенную автономность исходных магм, которые и определили пути развития соответствующих серий. Учитывая то, что в объеме поставленного на поверхность материала доминирующая роль принадлежит породам ассоциации I, вулканическая деятельность как изначально, так и на протяжении всего периода активности стратовулканов была связана с функционированием очага базальтовой магмы, из которого ее дифференциаты последовательно поднимались к поверхности, наращивая конус.

Согласно геологическим, петрохимическим и минералогическим данным, в ходе формирования массива Зиминых Сопок традиционный ход вулканизма осложняется появлением магм с повышением содержанием калия, которые извергаются из того же эруптивного центра. В развитие сказанного возможна ситуация, когда в одно извержение вовлекались магмы разного состава, в пользу чего служит наличие полосчатых лав с составом полос андезитов ассоциации I и II (рис. 4). Нам представляется, что образование магм разного состава, которые слагают персональные дифференцированные ряды, исключает образование их в результате фракционной кристаллизации в едином очаге и при единых РТ условиях кристаллизации.

В то же время тенденция повышения содержания  $K_2O$  от андезибазальтов ассоциации I к таковым ассоциации III и от основных андезитов ассоциации I к андезитам ассоциации II (рис. 3) свидетельствуют о существовании процесса, приводящего к обогащению магм калием в ходе их формирования. Так как на всех диаграммах породы фундамента занимают обособленные позиции, мала вероятность образования высоко-К магмы ассоциации III из андезибазальтов ассоциации I в результате ассимиляции трахиандезибазальтов фундамента (рис. 3, 5).

Таким образом, на основании всего изложенного выше логично признать существование в пределах единой сквозной магматической системы разноглубинных промежуточных очагов с разными условиями образования исходных дочерних андезибазальтовых магм, которые в процессе вулканической деятельности имели непосредственную связь с более глубокой материнской магмой. Расчетные данные РТ условий кристаллизации минеральных парагенезисов (табл. 6) предполагают, что внутрикоровые очаги располагались в мантийно-коровой области в диапазоне глубин 10–20 км. Об увеличении роли калия в магматической системе вулканических проявлений массива Зиминых сопки также свидетельствуют распределения составов минералов из андезибазальтов ассоциации II, которые показывают наличие ортогональных трендов содержаний  $TiO_2$  в клинопироксенах,  $MnO$  в ортопироксенах и  $Ort$  в плагиоклазах. Этот тренд исходит от андезибазальтов ассоциации I в область составов пород ассоциации III (рис. 5б, 5г-е). Об этом так же свидетельствует существенная разница в содержаниях ортоклазового минала во включении лабрадора и в минерале хозяине состава андезина (рис. 7в).



**Рис. 7.** Взаимоотношения минеральных фаз в породах массива Зиминых сопки: а-б — кристаллы Срх из андезибазальта ассоциации I: кристалл Срх с повторяющейся зональностью (а), зональный кристалл Срх с высокомагнезиальным ядром (б); в — кристалл Pl из андезибазальта ассоциации II, включение лабрадора в андезите.

**Fig. 7.** Mineral phase correlation in rocks of the Ziminy Sopki Volcanic Massif: а-б — Cpx crystals from andesite-basalt of the I association: Cpx crystals with repeating zonation (а), the Cpx zonation crystal with high magnesian host (б); в — Pl crystal from andesite-basalt of the II association, labrador inclusions in andesite.

Выяснение сценария, наилучшим образом описывающего геохимическую эволюцию пород массива Зиминых сопкок, является важной задачей, решение которой способно пролить свет на историю формирования других Камчатских объектов. Такие исследования требуют привлечения дополнительных геохимических данных и будут являться предметом будущих публикаций. Существование серий пород разной калиевой щелочности, которые связаны с одним вулканическим центром, в пределах Ключевской группы вулканов прослеживается в ее истории от среднего плейстоцена до современного времени (Брайцева и др. 1984; Флеров и др., 2015, 2017; Чурикова и др., 2017а, 2017б, 2018; Churikova et al., 2001, 2015а, 2015б, 2018). Тем не менее, происхождение этих серий находится в стадии жарких дебатов.

Список литературы [Referenses]

- Борисова В.Н.* Алунитизация в прикратерной части вулкана Зимины // Современный вулканизм. Труды Второго Всесоюзного вулканологического совещания. Петропавловск-Камчатский, 3–17 сентября 1964 г. Москва, Наука, 1966. С. 192–197 [*Borisova V.N.* Alunitizatsiya v prikraternoj chasti vulkana Zimina // *Sovremennyy vulkanizm. Trudy Vtorogo Vsesoyuznogo vulkanologicheskogo soveshchaniya. Petropavlovsk-Kamchatskij, 3–17 sentyabrya 1964 g.* Moskva: Nauka, 1966. P. 192–197 (in Russian)].
- Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Флеров Г.Б. и др.* Голоценовый вулканизм Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов // Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка 1975–1976. М.: Наука, 1984. С. 177–222 [*Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Flerov G.B. et al.* Holocene volcanism of the Tolbachik regional zone of cinder cones // *Large Tolbachik Fissure Eruption. Kamchatka 1975–1976.* Moscow: Science. 1984. P. 177–222 (in Russian)].
- Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В. и др.* Возраст действующих вулканов Курило-Камчатского региона // Вулканология и сейсмология 1994, № 4-5. С. 5–32 [*Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V. et al.* Ages of Active Volcanoes in the Kuril-Kamchatka Region // *Volcanology and seismology 1995. V. 16. № 4–5. P. 341–370*].
- Влодавец В.И.* Ключевская группа вулканов // Труды Камчатской вулканологической станции. 1940. Вып. 1. С. 1–124 [*Vlodavetz V.I.* The Klyuchevsky group of volcanoes // *Transactions of the Kamchatka volcanological station. 1940, V. 1. P. 1–124* (in Russian)].
- Влодавец В.И., Пийп Б.И.* Каталог действующих вулканов Камчатки // Бюллетень вулканологических станций. 1957. № 25. С. 5–95 [*Vlodavetz V.I., Piip B.I.* Catalogue of the Active Volcanoes and Solfatara Fields of Kamchatka and Continental Areas of Asia // *Catalogue of the Active Volcanoes of the World. Including Solfatara Fields. Pt. 8. Napoli, 1959. 110 p.*].
- Ермаков В.А.* Формационное расчленение четвертичных вулканических пород // М.: Недра, 1977. 223 p. [*Ermakov V.A.* Formacionnoe raschlenenie chetvertichnyh vulkanicheskikh porod // Moscow: Nedra, 1977. 223 p. (in Russian)].
- Иванов Б.В.* Андезиты Камчатки (Справочник химических анализов вулканитов и основных породообразующих минералов) // М.: Наука, 2008. 365 p. [*Ivanov B.V.* Andesites of Kamchatka (Reference guide to the chemical analysis of volcanites and basic rock-forming minerals) // Moscow: Nauka, 2008. 364 p. (in Russian)].
- Мелекесцев И.В., Краевая Т.С., Брайцева О.А.* Рельеф и отложения молодых вулканических районов Камчатки // М.: Наука, 1970. 104 с. [*Melekestsev I.V., Krayevaya T.S., Braitseva O.A.* Rel'efi otlozheniya molodyh vulkanicheskikh rajonov Kamchatki // Moscow: Nauka, 1970. 104 p. (in Russian)].
- Певзнер М.М., Толстых М.Л., Бабанский А.Д. и др.* Первые данные об изотопном возрасте и составе исходных расплавов пород начальной фазы деятельности вулканического массива Шивелуч, Камчатка // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы региональной научной конференции, посвящённой Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, 27–28 марта 2014. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2014. С. 105–108 [*Pevzner M.M., Tolstyh M.L., Babansky A.D. et al.* Pervye dannye ob izotopnom vozraste i sostave iskhodnyh rasplavov porod nachal'noj fazy deyatel'nosti vulkanicheskogo massiva SHiveluch, Kamchatka // *Vulkanizm i svyazannye s nim processy. Materialy regional'noj nauchnoj konferencii, posvyashchyonnoj Dnyu vulkanologa. Petropavlovsk-Kamchatskij, 27–28 marta 2014.* Petropavlovsk-Kamchatskij: IViS DVO RAN, 2014. P. 105–108 (in Russian)].
- Пийп Б.И.* Ключевская сопка и ее извержения в 1944–45 гг. и в прошлом // Труды лаборатории вулканологии. 1956, Вып. 11. С. 1–310 [*Piip B.I.* Klyuchevskaya sopka i ee izverzheniya v 1944–45 gg i v proshlom // *Trudy laboratorii vulkanologii. 1956, V. 11. P. 1–310* (in Russian)].
- Флеров Г.Б., Ананьев В.В., Пономарев Г.П.* Петрогенезис пород вулканов Острого и Плоского Толбачиков и соотношение вулканических проявлений базальтовой и трахибазальтовой магм на территории Толбачинского Дола (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2015. № 3. С. 15–35 [*Flerov G.B., Anan'ev V.V., Ponomarev G.P.* The petrogenesis of rocks of the Ostryi and Ploskii volcanoes and the relationship between volcanic occurrences of basaltic and trachybasaltic magmas in the Tolbachik Dol area, Kamchatka // *Journal of Volcanology and Seismology. 2015. V. 9. № 3. P. 162–181*].
- Флеров Г.Б., Чурикова Т.Г., Ананьев В.В.* Вулканический массив Плоских Сопкок: геология, петрохимия, минералогия и петрогенезис пород (Ключевская группа вулканов, Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2017. № 4. С. 30–47. <https://doi.org/10.7868/S0203030617040022> [*Flerov G.B., Churikova T.G., Anan'ev V.V.* The ploskie sopki volcanic massif: Geology, petrochemistry, mineralogy, and petrogenesis (Klyuchevskoi volcanic cluster, Kamchatka) // *Journal of Volcanology and Seismology. 2017. V. 11. № 4. P. 266–284. https://doi.org/10.1134/S0742046317040030].*
- Чурикова Т.Г., Гордейчик Б.Н., Флеров Г.Б. и др.* Петрологическая, геохимическая и изотопная эволю-

- ция Толбачинского вулканического массива // Толбачинское трещинное извержение 2012–2013 гг. (ТТИ-50) Новосибирск. Издательство СО РАН. 2017. С. 131–172 [Churikova T.G., Gordeychik B.N., Flerov G.B. et al. Petrologicheskaya, geohimicheskaya i izotopnaya evolyuciya Tolbachinskogo vulkanicheskogo massiva // Tolbachinskoe treshchinnoe izverzhenie 2012–2013. (ТТИ-50) Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN, 2017a. P. 131–172 (in Russian)].
- Чурикова Т.Г., Гордейчик Б.Н., Эдвардс Б.Р. и др. Ключевская группа вулканов и Толбачинский вулканический массив: итоги исследований, предшествующих извержению 2012–2013 гг. // Толбачинское трещинное извержение 2012–2013 гг. (ТТИ-50) Новосибирск. Издательство СО РАН, 2017б. С. 36–68 [Churikova T.G., Gordeychik B.N., Edwards B.R. et al. Klyuchevskaya группа vulkanov i Tolbachinskij vulkanicheskij massiv: itogi issledovaniy, predshestvuyushchih izverzheniyu 2012–2013 gg. // Tolbachinskoe treshchinnoe izverzhenie 2012–2013. (ТТИ-50) Novosibirsk. Izdatel'stvo SO RAN, 2017b. P. 36–68 (in Russian)].
- Чурикова Т.Г., Гордейчик Б.Н., Флеров Г.Б., Вёрнер Г. Петрология и геохимия вулканов юго-восточной части Ключевской группы // Вулканизм, биосфера и экологические проблемы. Девятая Всероссийская научная конференция с международным участием. Сборник материалов. Туапсе, 27 сентября – 1 октября 2018 г. Майкоп-Краснодар-Туапсе: Изд-во «Магарин О.Г.», 2018. С. 28–33 [Churikova T.G., Gordeychik B.N., Flerov G.B., Vyornner G. Petrologiya i geohimiya vulkanov yugo-vostochnoj chasti Klyuchevskoj grupy // Vulkanizm, biosfera i ekologicheskie problemy. Devyataya Vserossiyskaya nauchnaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem. Sbornik materialov. Tuapse, 27 sentyabrya – 1 oktyabrya 2018 g. Majkop-Krasnodar-Tuapse: Izd-vo «Magarin O.G.», 2018. P. 28–33].
- Calkins J. A.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of Khapitsa plateau and Studyonaya river basalts and basaltic andesites in Central Kamchatka depression, Kamchatka, Russia // Linkages among tectonics, seismicity, magma genesis, and eruption in volcanic arcs. IV international biennial workshop on subduction processes emphasizing the Japan–Kurile–Kamchatka–Aleutian arcs. Petropavlovsk-Kamchatsky, August 21–27, 2004. Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS FEB RAS, 2004. P. 53–54.
- Churikova T.G., Gordeychik B.N., Iwamori H. et al. Petrological and geochemical evolution of the Tolbachik volcanic massif, Kamchatka, Russia // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015a. V. 307. P. 156–181. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.10.026>.
- Churikova T.G., Gordeychik B.N., Edwards B.R. et al. The Tolbachik volcanic massif: A review of the petrology, volcanology and eruption history prior to the 2012–2013 eruption // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015b. V. 307. P. 3–21. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.10.016>.
- Churikova T., Gordeychik B., Flerov G., Wörner G. Compositional variations in lavas of the Klyuchevskaya Volcanic Group (Kamchatka) // AGU Fall Meeting 2018. Washington, D.C., December 10–14, 2018. Washington, D.C.: AGU, 2018. P. T21G-1640.
- Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1976, V. 58, Iss. 1. P. 63–81. <https://doi.org/10.1007/bf00384745>.
- Poldervaart A., Hess H.H. Pyroxenes in the Crystallization of Basaltic Magma // The Journal of Geology. 1951, V. 59, № 5. P. 472–489. <http://doi.org/10.1086/625891>.
- Putirka Keith D. Thermometers and Barometers for Volcanic Systems // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2008. V. 69. № 1. P. 61–120. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.3>

## THE ZIMINY SOPKI VOLCANIC MASSIF: GEOLOGY AND MINERALOGY OF ROCKS (THE KLYUCHEVSKOY VOLCANIC GROUP, KAMCHATKA)

G.B. Flerov<sup>1</sup>, T.G. Churikova<sup>1,2</sup>, B.N. Gordeychik<sup>2,3</sup>, V.V. Ananyev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

<sup>2</sup>Department of Geochemistry, Center for Earth Sciences, University of Göttingen, Göttingen, Germany

<sup>3</sup>Institute of Experimental Mineralogy RAS, Chernogolovka, Russia

The Ziminy Sopki Volcanic Massif is remarkable for its co-formation from magmas of different potassium alkalinity manifested by three rocks associations (series) with individual evolutionary trends: I — andesite-basalts — andesites — dacites; II — andesite-basalts — the intermediate composition andesites; III — high potassium andesite-basalts. Variations of rocks from the revealed series manifest themselves in the above mentioned mineral associations, and the discreteness of rocks regression lines evidence on quite autonomous parental magmas. Orthogonal trends of minerals composition alterations in andesite-basalts with the vector correlating with the potassium alkalinity increase in rocks of associations evidence on existence of the process leading to the enrichment of these magmas with potassium. Thus, we can conclude that, within the single penetrated magmatic system, there are deep intermediate chambers with different conditions for formation of the initial andesite-basalt magmas, which during volcanic activity directly associated with the deeper parental basaltic magma.

*Keywords: associations, andesite-basalts, potassium alkalinity, chamber, Ziminy Sopki Volcanic Massif.*