

**Тренды некогерентных элементов в высокомагнезиальных базальтах Толбачинского дола (Камчатка) и возможные причины их возникновения**  
*Черкашин Р.И., Озеров А.Ю., Максимов А.П.*

**Trends of incoherent elements in high-magnesian basalts of the Tolbachinsky Dol (Kamchatka) and possible causes of their occurrence**

*Cherkashin R.I., Ozerov A.Yu., Maksimov A.P.*

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

В работе представлены данные о составе макро- и микроэлементов в высокомагнезиальных базальтах центральной части Толбачинского дола. Обнаружены значительные вариации некогерентных элементов, формирующие тренды, природа которых может быть связана с малоглубинной дифференциацией единого глубинного источника примитивной магмы.

### **Введение**

Базальты вулкана Толбачик формируют широкую петрохимическую серию от высокомагнезиальных (ВМ) базальтов до высокоглиноземистых (ВГ) базальтов-андезитобазальтов [1, 2, 5, 8]. В пределах этой серии выделяются два тренда пород, которые характеризуются схожими интервалами содержаний главных оксидов ( $\text{SiO}_2$  49-52 вес. %,  $\text{MgO}$  10-3 вес. %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  13-18 вес. %), но отличаются по концентрациям  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$  и всего спектра микроэлементов [5]. Вопрос о природе этих трендов является важным для понимания формирования серии пород вулкана.

За последние ~2 тыс. лет активности Толбачинской трещинной зоны примерно треть извержений моногенных конусов здесь представлены ВМ-базальтами ( $\text{MgO} \geq 10$  вес. %) [1]. Изучение этих примитивных пород может дать ключи к пониманию формирования всей магматической серии пород вулкана. Извержения конусов 1004 (~1600 л.н.), Алаид (~1000 л.н.) и Северного прорыва БТТИ (1975-1976 гг.) на Толбачинском долу поставляли на поверхность ВМ-базальты [1, 8]. Все эти конусы расположены вдоль центральной части Толбачинской трещинной зоны протяженностью около 5 км [1], что позволяет предполагать генетическую преемственность магм и взаимосвязь магматических питающих систем данных извержений.

Ранее полученные [3] и новые петро- и геохимические данные о составах детально опробованных ВМ-пород конусов 1004, Алаид и 2-го конуса Северного прорыва БТТИ (далее – СП2) на Толбачинском долу впервые позволили обнаружить непрерывные вариации некогерентных элементов, формирующие тренды. В настоящей работе мы рассуждаем о природе этих трендов и их возможной взаимосвязи с двумя более крупными петрохимическими трендами для всей магматической серии пород Толбачинского массива.

### **Образцы и методы исследования**

В ходе полевых работ в 2020-2024 гг. было произведено детальное опробование изверженных пород конусов 1004, Алаид и СП2. Образцы лав, взятые для дальнейшего анализа, отбирались с учетом охвата разных порций извержений каждого конуса, а также с учетом петрографических различий лав (от афировых до порфириковых, от плотных до умеренно-пористых). Вся коллекция проанализированных образцов представлена магнезиальными и высокомагнезиальными базальтами.

Исследования валового вещественного состава пород проводились в Центре коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН (г. Иркутск). Содержания петрогенных оксидов определялись методом XRF на волнодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре S8 Tiger (Bruker AXS, Германия). Состав микроэлементов анализировали методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7900 ce (Agilent Technologies Inc., США). Для градуировки прибора и контроля измерений

использовали стандартные образцы Геологических служб США основного состава – базальты BCR-2, BHVO-2.

Исследование состава основной массы (матрикса) высокомагнезиальных базальтов конуса 1004 проводилось с применением сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) VEGA 3 TESCAN, оснащенного энергодисперсионным спектрометром X-MAX 80 mm<sup>2</sup> с программным обеспечением AZtec Oxford Instruments (ИВиС ДВО РАН, аналитики С.В. Москалева, Е.Ю. Плутахина).

### Результаты и обсуждение

На диаграммах рис. 1 точки составов пород трех рассматриваемых конусов формируют компактный высокомагнезиальный (MgO 10.9-9.0 вес. %) участок магматической серии пород Толбачинского массива с весьма малыми вариациями содержаний SiO<sub>2</sub> (50.2-51.4 вес. %) и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (13.2-14.8 вес. %). При этом в породах трех конусов наблюдаются значительные вариации по содержаниям K<sub>2</sub>O (0.77-1.45 вес. %), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0.20-0.44 вес. %), TiO<sub>2</sub> (0.95-1.45 вес. %), CaO (12.4-9.2 вес. %) (рис. 1) и всему спектру некогерентных микроэлементов (Ba, Rb, Zr, Ce, La, Lu, Y, Yb, Hf, Th и др., рис. 2). Содержания K<sub>2</sub>O и микроэлементов в породах прямо коррелируют между собой (рис. 2).

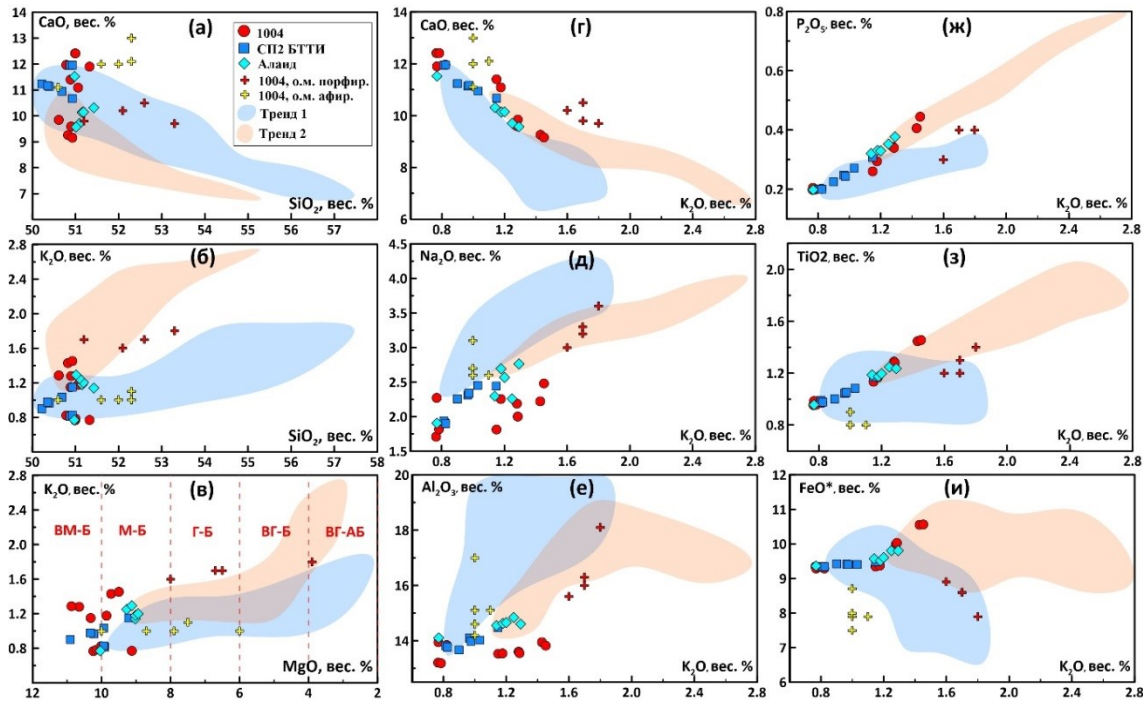


Рис. 1. Диаграммы содержаний петрогенных оксидов в зависимости от SiO<sub>2</sub> (а-б), от MgO (в) и от K<sub>2</sub>O (г-и) в высокомагнезиальных базальтах конусов 1004, СП2 и Алаид. На (в): ВМ-Б – высокомагнезиальные базальты, М-Б – магнезиальные базальты, Г-Б – глиноземистые базальты, ВГ-Б – высокоглиноземистые базальты, ВГ-АБ – высокоглиноземистые базальты-андезитбазальты. Крестиками показаны составы основной массы высоко-К (порфировых) и средне-К (афировых) высокомагнезиальных базальтов конуса 1004. Цветными полями составов показаны тренды 1 (средне-К) и 2 (высоко-К) пород Толбачинского вулканического массива по данным [5]. Все содержания железа пересчитаны на FeO (FeO\*=Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>×0.9).

Важно отметить непрерывный характер вариаций содержаний K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub> и CaO и большинства микроэлементов в высокомагнезиальных базальтах конусов 1004, Алаид и СП2, с наличием переходных по составу пород от средне-К до высоко-К (рис. 1г-и, рис. 2). Такие переходные разности базальтов имеют состав K<sub>2</sub>O 1.13-1.18 вес. %, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.26-0.31 вес. %, TiO<sub>2</sub> 1.11-1.18 вес. %, CaO 10.02-11.18 вес. % при прочих идентичных содержаниях MgO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для всех изученных пород. Такие

непрерывные вариации составов формируют отдельный тренд несовместимых микроэлементов в пределах высокомагнезиального участка магматической серии пород Толбачинского массива.

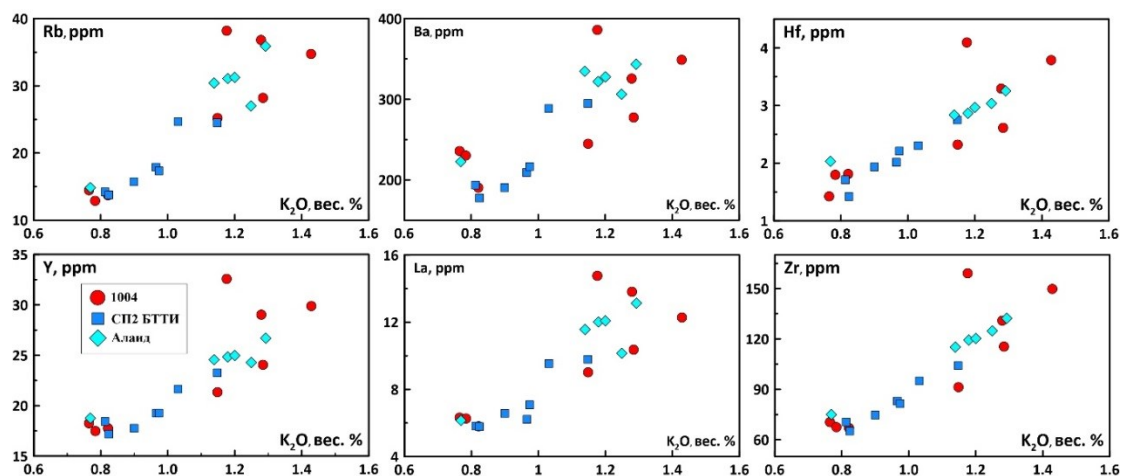


Рис. 2. Диаграммы содержаний некоторых микроэлементов в зависимости от  $K_2O$  в высокомагнезиальных базальтах конусов 1004, СП2 и Алаид.

Точки составов основной массы пород в высоко-К (порфировых) и средне-К (афировых) ВМ-базальтах конуса 1004 [3] также отображены на петрохимических диаграммах (рис. 1). Составы основной массы пород были получены на СЭМ путем накопления площадных спектров для участков пород, содержащих минимум кристаллов. Площади накопления спектров менялись от  $1.0 \text{ мм}^2$  до  $0.1 \text{ мм}^2$  с последовательной фокусировкой на наименее раскристаллизованных участках базальтов. Таким образом, точки составов основной массы ВМ-базальтов конуса 1004 на диаграммах (рис. 1а-в, е, и) отражают возрастающую степень фракционирования расплава (рост содержаний  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ , уменьшение содержаний  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$ ) для двух геохимически контрастных ВМ-базальтов. Примечательно, что на ряде диаграмм (рис. 1б-е) составы основной массы средне-К базальтов повторяют тренд 1, а высоко-К базальтов – тренд 2 магматической серии пород Толбачинского массива. Это потенциально может указывать на происхождение двух трендов пород Толбачика от родоначальных ВМ-магм с контрастными геохимическими характеристиками.

Бинарные диаграммы отношений  $\text{La}/\text{Yb}-\text{Sr}/\text{Sm}$  и  $\text{Sr}/\text{Y}-\text{Zr}/\text{Hf}$  (рис. 3а, б) показывают, что составы ВМ-базальтов конусов 1004, Алаид и СП2 попадают в поля обоих трендов пород Толбачинского массива [5], заполняя и переходные между ними области. Изменения отношений  $\text{Nb}/\text{Zr}$  с ростом  $\text{K}_2\text{O}$  в породах трех конусов (рис. 3в) указывают на то, что наблюдаемые вариации некогерентных элементов в ВМ-базальтах нельзя получить путем простого фракционирования единого магматического источника.

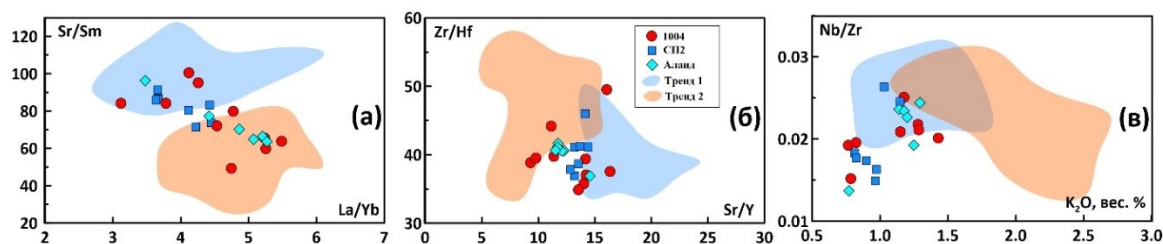


Рис. 3. Бинарные диаграммы отношений  $\text{La}/\text{Yb}-\text{Sr}/\text{Sm}$  (а),  $\text{Sr}/\text{Y}-\text{Zr}/\text{Hf}$  (б) и  $\text{K}_2\text{O}-\text{Nb}/\text{Zr}$  (в) для высокомагнезиальных базальтов конусов 1004, СП2 и Алаид.

Для объяснения наблюдаемых трендов некогерентных элементов в ВМ-лавах изученных конусов можно предположить участие двух исходных гетерогенных магм с

разной степенью обогащения калием и микроэлементами, а также процессы их смешения. Подобным образом ранее пробовали объяснить широкие вариации калия и микроэлементов в ВМ-лавах моногенного извержения на поле Big Pine (Калифорния) [4]. Однако, учитывая наличие таких вариаций даже в лавах кратковременного (67 дней) извержения Северного прорыва БТТИ [1], считаем спорной идею о гетерогенности исходных магм. По нашему мнению, возможная причина возникновения наблюдаемых трендов в составах ВМ-базальтов центральной части конусов Толбачинского дола заключается в малоглубинной дифференциации единого глубинного источника примитивной магмы.

Механизмом такой дифференциации может быть конвекция остаточного расплава между краевой (кристаллизующейся) и центральной (жидкой) частями магматической камеры при кристаллизации *in situ* [7], что приводит к сильному изменению концентраций несовместимых элементов относительно совместимых. Возможная роль этого процесса ранее отмечалась для объяснения геохимических вариаций в Толбачинских магмах [8]. Другой возможный процесс – разделение структуры в разной степени полимеризованных силикатных расплавов по мере быстрого подъема и охлаждения магм, что ведет к дифференциации химических компонентов [6].

### Заключение

Выявлены новые закономерности в составах ВМ-базальтов Толбачинского дола (конусов 1004, Алайд, 2-го конуса Северного прорыва БТТИ) – тренды некогерентных элементов ( $K_2O$ ,  $P_2O_5$ ,  $TiO_2$ , Ba, Rb, Zr, La, Y, Hf и др.). Природа таких трендов может быть связана с малоглубинной дифференциацией единого глубинного источника примитивной магмы. Механизмы такой дифференциации потенциально могут играть важную роль и в формировании двух петрохимических трендов пород Толбачинского массива.

### Список литературы

1. Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка. 1975-1976. / Под ред. С.А. Федотова, Г.Б. Флерова, А.М. Чиркова. М.: Наука, 1984. 637 с.
2. Толбачинское трещинное извержение 2012-2013 гг. (ТТИ-50) / Под ред. Е.И. Гордеева, Н.Л. Добрецова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 421 с.
3. Черкашин Р.И., Озеров А.Ю. Порфиновые и афировые высокомагнезиальные базальты конуса 1004 в контексте представлений о механизмах формирования магматической серии пород Толбачинского дола (Камчатка) // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXVIII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, 24-29 марта 2025 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2025. С. 162-165.
4. *Blondes M.S., Reiners P.W., Ducea M.N. et al.* Temporal-compositional trends over short and long time-scales in basalts of the Big Pine Volcanic Field, California // *Earth and Planetary Science Letters*. 2008. V. 269. № 1-2. P. 140-154. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.02.012>
5. *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*. 2015. V. 307. P. 156-181. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.10.026>
6. *Gembitskaya I.M., Pharoe B.K.* Differentiation of Chemical Components in Basaltic Melts During Eruptions: An Example from Tolbachik–Hawaiian Fissure Zones and Etna Vent // *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*. 2023. V. 93. № 4. P. 543-552. <https://doi.org/10.1007/s40010-023-00843-x>
7. *Langmuir C.H.* Geochemical consequences of in situ crystallization // *Nature*. 1989. V. 340. Is. 6230. P. 199-205. <https://doi.org/10.1038/340199a0>
8. *Portnyagin M., Duggen S., Hauff F. et al.* Geochemistry of the late Holocene rocks from the Tolbachik volcanic field, Kamchatka: quantitative modelling of subduction-related open magmatic systems // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2015. V. 307. P. 133-155. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.08.015>