

Разнообразие неоднородностей в оливинах Толбачинских конусов

Гордейчик Б.Н.^{1,2}, Чурикова Т.Г.², Кронц А.³, Вёрнер Г.³

Diversity of heterogeneities in olivines of the Tolbachik cones

Gordeychik B.N., Churikova T.G., Kronz A., Wörner G.

¹ Институт экспериментальной минералогии РАН, г. Черноголовка;

e-mail: gordei@mail.ru

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

³ Geowissenschaftliches Zentrum Göttingen, Abteilung Geochemie, Universität Göttingen, Göttingen, Germany

Краткий обзор различных типов неоднородностей, встречающихся в оливинах из пород конусов Толбачинской трещинной зоны. Показано присутствие неоднородностей, испытавших диффузию и без следов диффузии, с прямой и обратной зональностью, продемонстрированы кристаллы, содержащие несколько неоднородностей.

Конуса Толбачинской трещинной зоны [2] с оливиносодержащими породами предоставляют богатый материал для изучения неоднородностей в оливинах. Измерения состава оливинов выполнялись в Геттингенском университете на электронном микронзонде JEOL JXA 8900RL, а их ориентация определялась там же на электронном микроскопе Quanta 200 F с EBSD приставкой. Методика измерений подробно изложена в [4]. Применение к результатам измерений комплекса моделей [1] позволяет подробно изучить обильное разнообразие неоднородностей в оливинах Толбачинских конусов.

Рисунок 1 показывает классическую прямую краевую зональность в оливине из Красного конуса (ныне практически полностью уничтожен извержением ТТИ-50).

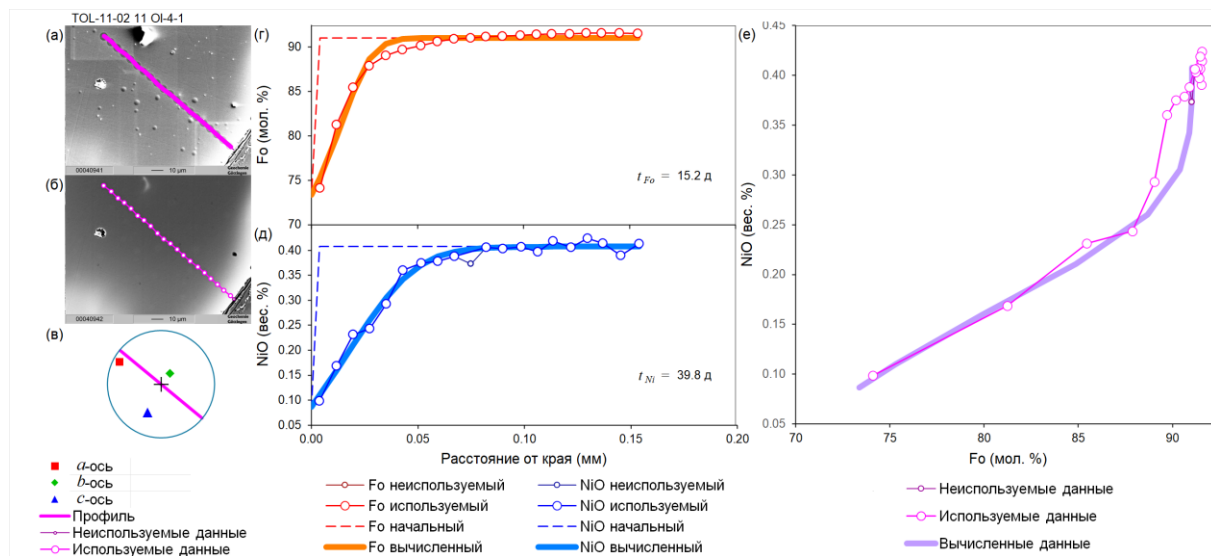


Рис. 1. Прямая краевая зональность в неподверженном диффузии оливине TOL-11-02 11 OI-4-1 из Красного конуса. Изображение (а) во вторичных электронах (SEI) показывает фенокристалл оливина в шлифе с измеренным профилем. Изображение (б) в обратно рассеянных электронах в композиционном режиме (COMPO) демонстрирует распределение атомных номеров по неоднородному фенокристаллу; положение маркеров соответствует положению измеренных (используемых и неиспользуемых в расчете) точек профиля. Стереографический график в нижней полусфере (в) отображает проекции кристаллографических осей a, b и c кристалла, а также ориентацию профиля. Графики Fo (г) и NiO (д) показывают измерения, используемые и неиспользуемые в моделировании. Измерения могут не использоваться, если, например, они находятся за пределами моделируемой зоны, подвержены влиянию соседних зон, либо считаются выбросами или дефектами измерений. На тех же графиках показаны начальные условия и вычисленные решения для Fo и NiO. Диаграмма Fo-Ni (е), на которой показаны как результаты измерений, так и результаты моделирования, позволяет выявить особенности поведения неоднородных зон различного происхождения.

Измерения показывают, что центральная часть оливина однородна как по форстериту (Fo) (рис. 1г), так и по никелю (Ni) (рис. 1д). Оба компонента (Fo и Ni) начинают уменьшаться лишь на краю кристалла. Комплекс моделей [1] хорошо воспроизводит не только пространственные графики, но и Fo-Ni диаграмму (рис. 1е). Оценки времени подъема магмы, полученные по Fo и Ni, дают интервал 15-40 дней.

Для вычисления времен подъема оливинов методами диффузионной хронометрии необходимо знать термодинамические условия в окружающей среде, которые можно получать различными минеральными окситермометрами. Описание этого инструментария и методики его использования [4] выходят за рамки настоящей краткой публикации, поэтому термодинамические параметры для конусов Толбачинского дола здесь и далее приводятся лишь справочно, без деталей, обсуждений и комментариев. При моделировании неоднородностей в оливинах из пород Красного конуса использовались температура $T=1245$ °С, давление $P=5100$ бар, фугитивность кислорода $lg(fO_2)=-7.25$.

Рисунок 2 показывает другой оливин из Красного конуса. Как и в первом случае, центральная часть оливина однородна по Fo и Ni, оба компонента также начинают уменьшаться лишь на краю кристалла (рис. 2г, д). Как и в первом случае, комплекс моделей [1] хорошо воспроизводит и пространственные графики измеренных компонент, и Fo-Ni диаграмму (рис. 2е). Оценки времени подъема магмы дают заметно меньший, чем в первом случае, интервал – 2.2-5 дней.

Графики, похожие на рис. 1, 2, можно найти практически в любой статье о зональности оливинов. Чем же они интересны и почему здесь приводятся два рисунка? Несмотря на общее сходство по всем перечисленным признакам, сопоставление рис. 1е и рис. 2е обнаруживает значительные различия на Fo-Ni диаграммах: кривая на графике 1е выпукла вниз, а на графике 2е – выпукла вверх. Ранее в работе [5] было показано, что Fo-Ni диаграммы при процессах фракционной кристаллизации и диффузии принципиально отличаются направлениями выпуклостей. Оба кристалла вначале записывали историю расплава, который эволюционировал в соответствии с фракционной кристаллизацией. Именно эта сохранившаяся запись наблюдается на выпуклом вниз графике 1е (обильная подборка примеров фракционной кристаллизации приведена в [6]). А на графике 2е диффузия стерла записанную историю фракционной кристаллизации и изменила знак выпуклости графика, подобно тому, как это происходит при формировании диффузионных трендов в оливине [5]. Таким образом, первый кристалл не был подвержен диффузии и рассчитанное по нему время дало физически бессмысленные результаты (в данном случае – завышенные на порядок).

Заметим, что измеренные краевые распределения одного компонента при фракционной кристаллизации и при диффузии весьма схожи. Если рассматривать только Fo или только Ni, то различить эти распределения не представляется возможным. Для определения генезиса неоднородности требуется совместный анализ Fo и Ni.

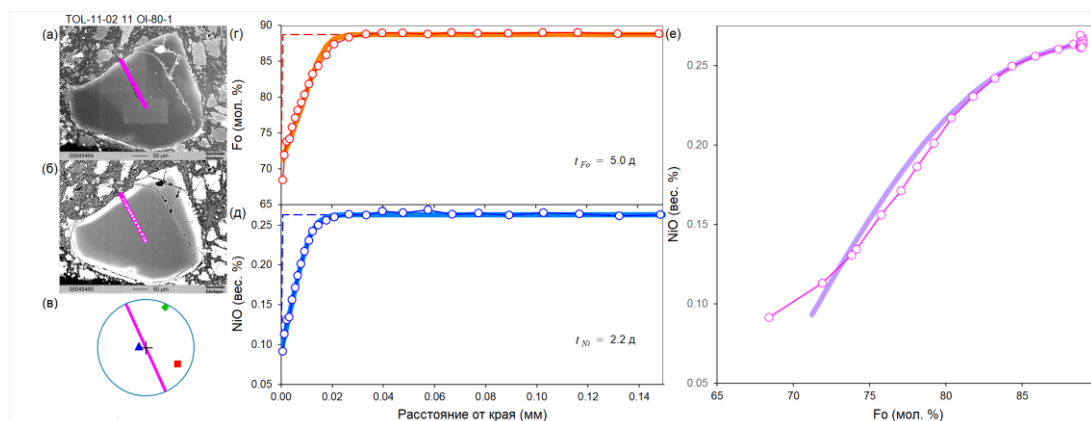


Рис. 2. Прямая краевая зональность в подверженном диффузии оливине TOL-11-02 11 Ol-80-1 из Красного конуса. Легенду и пояснения см. на рис. 1.

Рисунок 3 показывает обратную зональность в оливине из прорыва Набоко. Хотя Ni измерен с большими разбросами, выпуклая вниз Fo-Ni диаграмма не противоречит диффузионному происхождению неоднородности. Такая, охватывающая весь кристалл, зональность свидетельствует о процессах смешения в магматическом очаге с характерными временами 230-780 дней при $T=1130\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=2600\text{ бар}$, $fO_2 \sim NNO+1$.

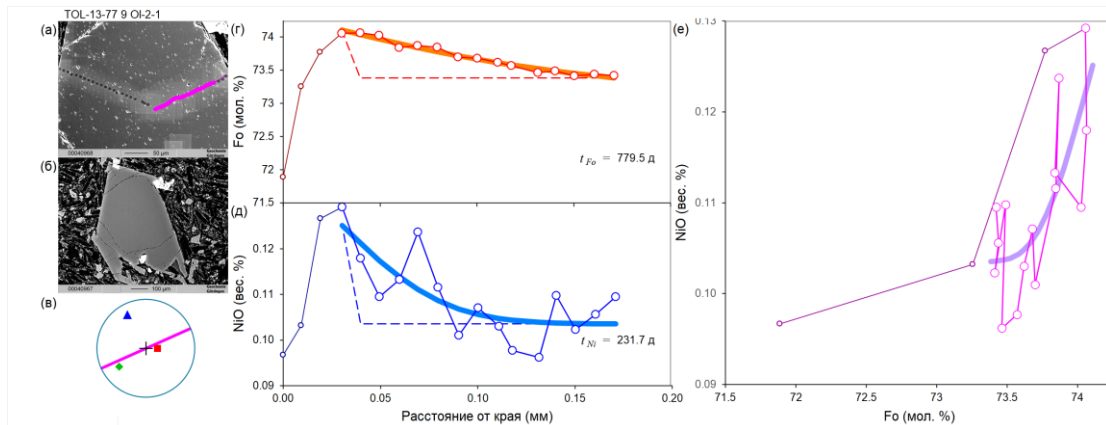


Рис. 3. Обратная зональность в оливине TOL-13-77 9 Ol-2-1 из прорыва Набоко. Легенду и пояснения см. на рис. 1.

Рисунок 4 показывает распределения Fo и Ni в оливине из лавы конуса 1941 г. Фенокристалл состоит из ядра и обрастания, причем каждая из этих частей имеет свою неоднородность, поэтому модели из [1] применялись по отдельности к каждой зоне. Внешне эти зоны с прямой зональностью похожи, однако Fo-Ni диаграмма на рис. 4е показывает их разнонаправленные выпуклости, что означает их различное происхождение. Внутренняя зона формировалась в магматическом очаге под действием диффузии в течение 3-18 дней при $T=1222\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=4900\text{ бар}$, $\lg(fO_2)=-6.96$. Внешняя зона в обрастании была сформирована фракционной кристаллизацией и не испытала влияния диффузии, поэтому оценка времен подъема по ее распределениям бессмысленна.

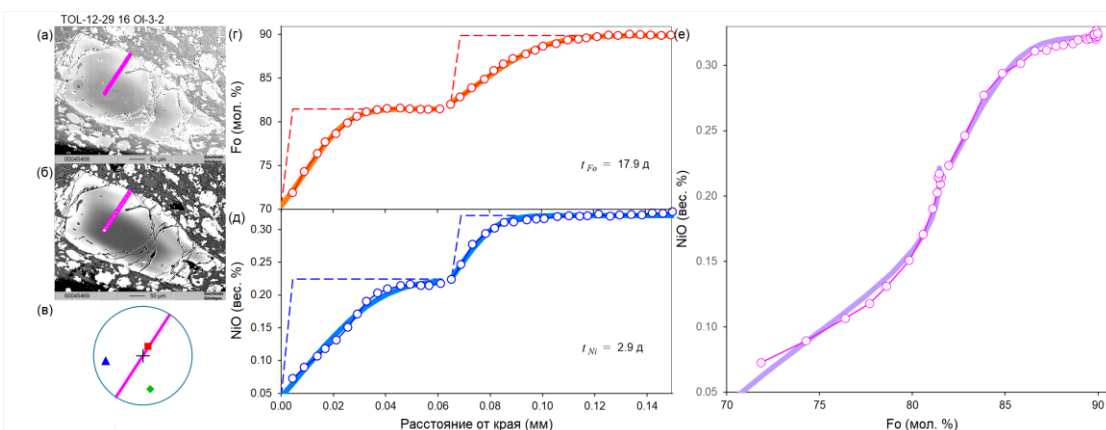


Рис. 4. Две неоднородности различного происхождения в оливине TOL-12-29 16 Ol-3-2 из конуса извержения 1941 г. Неоднородность в ядре, расположенная справа на графиках (г-е), сформирована под действием диффузии, а неоднородность в обрастании образовалась благодаря фракционной кристаллизации. Легенду и пояснения см. на рис. 1.

Другой оливин из лавы конуса 1941 года также состоит из ядра и обрастания, но ядро имеет обратную зональность (рис. 5). В этом оливине обе неоднородности имеют диффузионное происхождение. Внутренняя неоднородность формировалась в магматическом очаге под действием диффузии в 17-79 дней при $T=1222\text{ }^{\circ}\text{C}$,

$P=4900$ бар, $\lg(fO_2)=-6.96$. По внешней неоднородности определено время подъема как 18-23 дня при термодинамических параметрах $T=1187$ °С, $P=4900$ бар, $\lg(fO_2)=-6.96$.

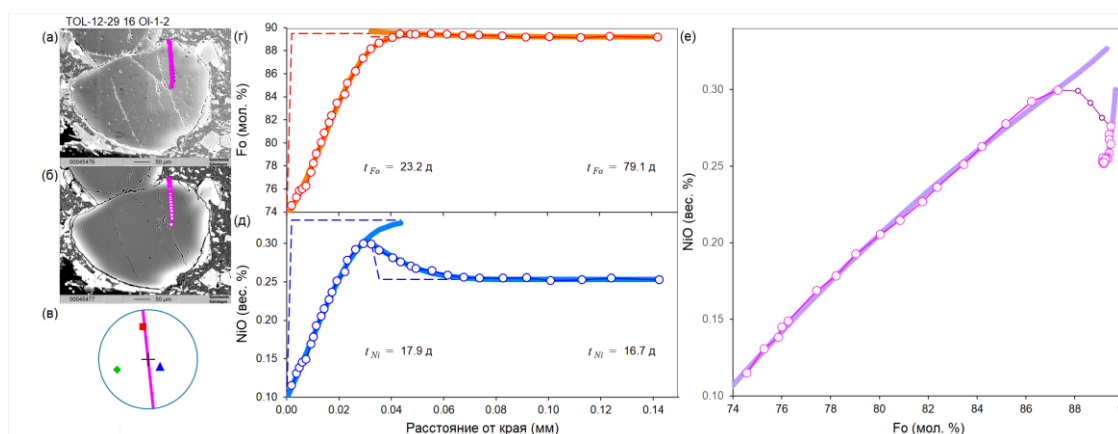


Рис. 5. Две неоднородности различного происхождения в оливине TOL-12-29 16 Ol-1-2 из конуса извержения 1941 г. создают немонотонные распределения Fo и Ni. Обе неоднородности сформированы под действием диффузии. Легенду и пояснения см. на рис. 1.

Присутствие контрастных расплавов различной степени фракционирования [3] в магматических очагах Толбачинской трещинной зоны определяет богатое разнообразие в строении оливинов. Доступны для изучения оливины как с прямой, так и с обратной зональностью, в том числе с немонотонными распределениями компонент. Показано, что неоднородности могут создаваться как диффузией, так и фракционной кристаллизацией, причем неоднородности различного генезиса могут соседствовать в одном профиле, а для их идентификации необходимы измерения как Fo, так и Ni.

Полевые работы выполнялись в рамках темы НИР FWME-2024-0009, составы оливинов измерялись в рамках темы НИР FWME-2024-0012, разработка моделей и проведение расчетов выполнялось в рамках темы НИР FMUF-2022-0004.

Список литературы

1. Гордейчик Б.Н., Чурикова Т.Г., Муравьев Я.Д. и др. Моделирование времен формирования Fo-Ni неоднородностей на примере оливинов Авачинского вулкана // 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. 57-60.
2. Флеров Г.Б., Андреев В.Н., Будников В.А., Цурюпа А.И. Петрология продуктов извержения // Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка 1975-1976 / Федотов С.А. (Ред.). Москва: Наука, 1984. С. 223-284.
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. Gordeychik B., Churikova T., Kronz A. et al. Growth of, and diffusion in, olivine in ultra-fast ascending basalt magmas from Shiveluch volcano // Scientific Reports. 2018. V. 8. Is. 1. Art. 11775. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30133-1>
5. Gordeychik B., Churikova T., Shea T. et al. Fo and Ni relations in olivine differentiate between crystallization and diffusion trends // Journal of Petrology. 2020. V. 61. Is. 9. Art. ega083. <https://doi.org/10.1093/petrology/egaa083>
6. Matzen A.K., Wood B.J., Baker M.B., Stolper E.M. The roles of pyroxenite and peridotite in the mantle sources of oceanic basalts // Nature Geoscience. 2017. V. 10. Is. 7. P. 530-535. <https://doi.org/10.1038/geo2968>