

**Магматическая активность Ключевского вулкана, предшествующая извержениям вулкана Безымянный**

**Кириухин А.В., Бергаль-Кувикас О.В., Лемзиков М.В.**

**Magmatic activity of Klyuchevskoy volcano preceding the eruptions of Bezymianny volcano**

**Kiryukhin A.V., Bergal-Kuvikas O.V., Lemzikov M.V.**

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

*e-mail: AVKiryukhin2@mail.ru*

Frac-Digger метод применен для выявления трехмерного распределения и хронологии инъекций даек и силлов из магматических резервуаров Ключевского вулкана, предшествующих извержениям вулкана Безымянный в период с 2000 по 2020 гг. Показана система магматического питания вулкана Безымянный за счет вулкана Ключевской.

**Введение**

Ключевская группа вулканов (КГВ) включает действующие вулканы Ключевской, Крестовский, Ушковский, Безымянный и Плоский Толбачик; в 80 км к северо-востоку от Ключевского вулкана находится действующий вулкан Шивелуч. Гигантский стратовулкан Ключевской (возраст менее 7 тыс. лет) является самым продуктивным. Он извергает в среднем 60 млн тонн базальтов в год, или 1/4 от общего годового объема магмы всех 70 вулканов Курило-Камчатского вулканического пояса [11]. Стратовулкан Безымянный расположен всего в 10 км к югу от вулкана Ключевской. Вулкан Безымянный стал известен с 1956 года, когда после 2.5 тысяч лет относительного покоя он внезапно обрушился и выбросил 3 км<sup>3</sup> пирокластических потоков [16]. С тех пор продолжается его бурная деятельность в виде частых эпизодических пирокластических извержений (не менее 44 значительных извержений с 1955 года) и куполообразования [16].

Теория проточных магматических камер для КГВ представлена в [11]. Она предполагает наличие нескольких магматических камер, размеры которых меняются в зависимости от температуры поступающей и выходящей магмы, возраста существования и интенсивности теплообмена с вмещающими породами. Предполагается стабильное существование под действующими вулканами однородных магматических камер эллипсоидной формы. Эта концепция согласуется с геофизическими моделями системы магматического питания КГВ [12], где предполагается наличие стабильных коровых магматических камер под Ключевским вулканом на глубинах от 0 км до 3 км и от 33 км до 25 км (общий объем 750 км<sup>3</sup>) и под Безымянным вулканом на глубинах от 7 км до 20 км (объем 100 км<sup>3</sup>).

В последние годы проблемы динамики магматических систем Ключевского вулкана были исследованы с помощью методов сейсмической томографии [23, 24]. В работе [1] метод сейсмотомографии применяется с расстановкой большого количества сейсмоприемников. В результате в диапазоне глубин до 150 км под Северной группой вулканов выявлены зоны насыщения земной коры магматическим расплавом.

В обобщающей работе [8, 9] отмечается в некоторых случаях синхронизация извержений Северной группы вулканов (Шивелуча, Ключевского, Безымянного): «Три вулкана часто работали в сближенных временных интервалах в течение одного года. Например, высокая активность вулканов Шивелуч, Ключевской и Безымянный регистрировалась в 2005, 2010 и 2017 гг. В 2005 г. 11 января наблюдалось извержение Безымянного, 15 января началось извержение Ключевского, продолжавшееся в течение трех месяцев, ... 30 ноября были отмечены извержения Безымянного. В 2010 г. на фоне извергавшегося с 16 сентября 2009 г. по 12 декабря 2010 г. Ключевского, произошло два мощных извержения – Безымянного 31 мая и Шивелуча 27 октября. В июне 2017 г.

на фоне эруптивной деятельности вулкана Ключевской произошло ... пароксизмальное извержение Безымянного 16 июня».

Статистический анализ извержений вулкана Безымянный в 2015-2020 гг. позволил предложить методику краткосрочного прогноза его извержений по сейсмическим данным (функция сейсмической энергии, выделившейся за 5 суток) [10].

Применение геохимических методов для магматических систем вулканов Ключевской и Безымянный позволило выявить концентрацию  $H_2O$  в родительских магмах вулкана Ключевской на уровне 3.5 масс. %, диапазон измеренных содержаний  $CO_2$  варьирует от 0.01 до 0.13 масс. % [7]. Продукты извержения вулкана Ключевской характеризуются значительным разнообразием состава (52.0-55.5 масс. %  $SiO_2$ ) и подразделяются на высокомагнезиальные базальтовые андезиты и глиноземистые андезиты. Высокомагнезиальные базальтовые андезиты с более низким содержанием К и более высоким содержанием Mg (>9 масс. % MgO) имеют петрологические характеристики, указывающие на то, что они могут быть первичными или близкими к первичным мантийными магмами [14]. Для определения времени пребывания свежих порций магмы, поступающих в неглубокую магматическую камеру вулкана Безымянный, была использована диффузионная хронометрия. Для шести извержений 2006-2012 гг. диапазон времени пребывания в камере составил от 2 месяцев до 3 лет до извержения [15].

В данной работе для выявления инъекций даек и силлов под вулканом Ключевской по сейсмическим данным [13, 25] применяется Frac-Digger метод [6]. Суть этого метода заключается в выявлении плоско-ориентированных кластеров гипоцентров землетрясений в заданном интервале времени. Выявленные объекты рассматриваются как инъекции магмы в форме даек или силлов. Описание и обоснование применимости метода изложено в монографии [2], а также в публикациях по его практическому применению для изучения вулканов Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Мутновский, Корякский и Авачинский [3-5, 19-22]. Полученная с использованием Frac-Digger метода динамическая 3D картина магматической деятельности позволяет ясно представить пути транспорта и аккумуляции магмы в фундаменте вулканов. Задачей данного исследования является выявление гидродинамического взаимодействия близрасположенных вулканов Ключевской и Безымянный, с учетом данных об общности их магматического питания [1].

### **Полученные результаты**

Выявлена магматическая активность под вулканами Ключевской и Безымянный в период с 2000 по 2020 гг. по сейсмогенным инъекциям магмы в виде даек и силлов. 3D-анализ последовательностей даек и силлов, предшествующих 17 извержениям вулкана Безымянный, показывает, что большинство извержений (10 из 17) инициированы дайками, инжектированными из глубинной магматической камеры Ключевского вулкана (K2, расположенной на интервале глубин от -31 до -27 км) в малоглубинную магматическую камеру Безымянного вулкана (B1, в интервале глубин от -3 до +2 км). В некоторых случаях извержениям вулкана Безымянный предшествовали дайки (4 из 17) или силлы (3 из 17), инжектированные из малоглубинной магматической камеры вулкана Ключевской (K1, расположенной на глубине от -1 до +2 км) (рисунок).

Двумерные численные модели распределения напряжений в условиях наклонного залегания слоев [18] указывают на возможность питания вулкана Безымянный за счет крутопадающих даек из глубинного магматического резервуара Ключевского вулкана K2, а также механизма дебондинга Кука-Гордона [17], открывающего слабый контакт на небольшой глубине для формирования силлов между малоглубинными магматическими резервуарами вулканов Ключевской K1 и Безымянный B1.

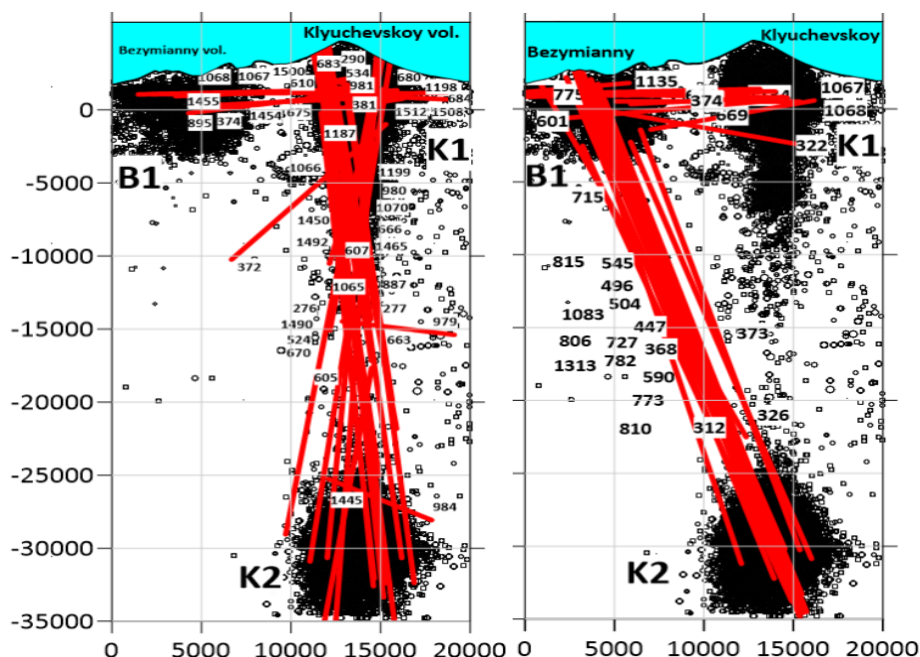


Рисунок. Магматическая активность, предшествующая извержениям вулкана Ключевской в 2003-2021 гг. (слева) и вулкана Безымянный в 2000-2020 гг. (справа). Красные линии – трассы сейсмогенных разрывов (дайки и силлы). Кружками обозначены проекции гипоцентров микроземлетрясений на плоскость разреза.

Геохимические характеристики продуктов извержений вулканов Безымянный и Ключевской свидетельствуют об общем источнике магм. Химическая история продуктов извержений этих двух вулканов показывает родительские свойства магмы вулкана Ключевской для продуктов вулкана Безымянный с некоторыми отклонениями в макрокомпонентах, которые могут быть объяснены с точки зрения химико-механических взаимодействий в магмоводах.

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда «Исследования магмо-газо-водопроводящих систем активных вулканов» № 23-27-00127 (<https://rscf.ru/project/23-27-00127/>).

### Список литературы

1. Гордеев Е.И., Кулаков И.Ю., Шапиро Н.М. Система магматического питания Ключевской группы вулканов (Камчатка) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 493. № 2. С. 68-73.
2. Кирюхин А.В. Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем // Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с.
3. Кирюхин А.В., Бергаль-Кувикас О.В., Лемзиков М.В., Журавлев Н.Б. Магматическая система Ключевского вулкана по сейсмическим данным и их геомеханической интерпретации // Записки Горного института. 2023. № 263. С. 698-714.
4. Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А. Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, связанной с извержениями и активизацией вулканов Толбачик, Корякский и Авачинский, Камчатка, 2008-2012 гг. // Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С. 3-20.
5. Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А. Магматические системы и условия глубинной гидротермальной циркуляции Ключевской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и термогидродинамического моделирования // Вулканология и сейсмология. 2018. № 4. С. 3-14.

6. *Кирюхин П.А., Кирюхин А.В.* Frac-Digger. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612168 от 21.06.2016.
7. *Мионов Н.Л., Портнягин М.В.* Содержание H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> в магмах источника Ключевского вулкана по данным изучения расплавных и флюидных включений в оливине // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 11. С. 1718-1735.
8. *Озеров А.Ю.* Ключевской вулкан: вещество, динамика, модель. М.: Геос, 2019. 306 с.
9. *Озеров А.Ю., Гирина О.А., Жаринов Н.А. и др.* Извержения в Северной группе вулканов, на Камчатке, в начале XXI века // Вулканология и сейсмология. 2020. Т. 14. С. 1-17.
10. *Салтыков В.А.* Прогнозирование извержений вулкана Безымянный (Камчатка) 2015–2020 гг.: результаты использования методики на основе СОУС'09, верификация параметров // Вулканология и сейсмология. 2022. № 6. С. 76-86.
11. *Федотов С.А.* Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 456 с.
12. *Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И.* Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об ее извержениях, землетрясениях и глубинном строении // Вулканология и сейсмология. 2010. № 1. С. 3-35.
13. *Чеброва А.Ю., Чемарев А.С., Матвеев Е.А. и др.* Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 66-91.
14. *Bergal-Kuvikas O., Nakagawa M., Kuritani T. et al.* A petrological and geochemical study on time-series samples from Klyuchevskoy volcano, Kamchatka arc // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2017. V. 172. № 5. P. 1-16.
15. *Davydova V.O., Shcherbakov V.D., Plechov P.Y., Perepelov A.B.* Petrology of mafic enclaves in the 2006–2012 eruptive products of Bezymianny Volcano, Kamchatka // Petrology. 2017. V. 25. № 6. P. 592-614.
16. *Girina O.A.* Chronology of Bezymianny Volcano activity, 1956-2010 // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. № 263. P. 22-41.
17. *Gudmundsson A.* Deflection of dykes into sills at discontinuities and magma-chamber formation // Tectonophysics. 2011. № 500. P. 50-64.
18. *Gudmundsson A.* How local stresses control magma-chamber ruptures, dyke injections, and eruptions in composite volcanoes // Earth-Sci. Reviews. 2006. № 79. P. 1-31.
19. *Kiryukhin A.V., Bergal-Kuvikas O.V., Lemzikov M.V.* Magmatic activity of Klyuchevskoy volcano triggering eruptions of Bezymianny volcano based on seismological and petrological data // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2023. V. 442. Art. 107892.
20. *Kiryukhin A., Chernykh E., Polyakov A., Solomatin A.* Magma Fracking Beneath Active Volcanoes Based on Seismic Data and Hydrothermal Activity Observations // Geosciences. 2020. V. 10. P. 52.
21. *Kiryukhin A., Lavrushin V., Kiryukhin P., Voronin P.* Geofluid Systems of Koryaksky-Avachinsky Volcanoes (Kamchatka, Russia) // Geofluids. 2017. V. 2017. Art. 4279652.
22. *Kiryukhin A.V., Polyakov A.Y., Voronin P.O. et al.* Magma Fracking and Production Reservoirs Beneath and Adjacent to Mutnovsky Volcano Based on Seismic Data and Hydrothermal Activity // Geothermics. 2022. V. 105. Art. 102474.
23. *Koulakov I., Abkadyrov I., Al Arifi N. et al.* Three different types of plumbing system beneath the neighboring active volcanoes of Tolbachik, Bezymianny, and Klyuchevskoy in Kamchatka // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2017. V. 122. P. 3852-3874.
24. *Koulakov I., Gordeev E.I., Dobretsov N.L. et al.* Rapid changes in magma storage beneath the Klyuchevskoy group of volcanoes inferred from time-dependent seismic tomography // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 263. P. 75-91.
25. *Senyukov S.L.* Prediction of eruptions of volcanoes Klyuchevskoy and Bezymianny in Kamchatka. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 144 p.