



Научная статья

Магматическая система Ключевского вулкана по сейсмическим данным и их геомеханической интерпретации

А.В.КИРЮХИН✉, О.В.БЕРГАЛЬ-КУВИКАС, М.В.ЛЕМЗИКОВ, Н.Б.ЖУРАВЛЕВ

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Как цитировать эту статью: 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. Т. 263. С. 698-714. EDN RPIBWW

Аннотация. Выполнен 3D-анализ механизма транспорта и аккумуляции магмы в постройке и фундаменте Ключевского вулкана, предшествующего 11 извержениям в 2003-2021 гг. С использованием метода Frac-Digger и сейсмологических данных Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» показано, что транспорт магмы из глубокого корового магматического очага (–30 км) осуществляется в режиме вертикального гидроразрыва (дайки) до периферического малоглубинного магматического очага (+1 км). Ориентация подводных даек соответствует геомеханическим условиям радиального или С-ССВ растяжения. Вслед за этим в периферическом магматическом очаге фиксируются наклонные дайки и силлы различной ориентации. Аккумуляция магмы в периферическом магматическом очаге в виде силлов (в режиме горизонтального гидроразрыва на отметках от +0,3 до +2,3 км) способствует повышению эффективности дегазации магмы и теплообмена с метеорными водами, формированию парогазового резервуара высокого давления с последующей продувкой канала вулкана и его извержением. Трехмерный анализ распределения побочных извержений Ключевского вулкана в 1932-2021 гг. (16 побочных конусов) показывает их приуроченность к двум магистральным слабонаклонным структурным поверхностям. Изменение уровня дренирования магматической системы находит отражение в объемах и геохимической истории продуктов побочных извержений 1932-2021 гг.

Ключевые слова: вулкан; Ключевской; магма; дайка; Frac-Digger

Благодарность. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда «Исследования магмогазо-водопродводящих систем активных вулканов» № 23-27-00127.

Поступила: 14.08.2023 **Принята:** 20.10.2023 **Онлайн:** 27.10.2023 **Опубликована:** 27.10.2023

Введение. Изучение магматических систем действующих вулканов позволяет получить информацию об условиях транспорта и аккумуляции магматических и водно-газовых флюидов во всем диапазоне глубин земной коры. Транспорт магматических флюидов в земной коре осуществляется в режиме гидроразрыва с формированием даек и силлов, магматических очагов, по которым в процессе постмагматической деятельности происходит формирование гидротермальных рудных и пароводяных месторождений [1]. Примером одного из таких месторождений является Гуанахуато (Мексика), где начиная с 1548 г. продукция золота составила 360 т из трех основных гидротермальных жил северо-западного простирания в риолитах, одна из которых – Вета Медра – имеет длину 23 км [2].

На Мутновском месторождении парогидротерм продуктивный разлом «Основной» длиной более 10 км, отходящий от магматического очага Мутновского вулкана, обеспечивает теплоносителем Мутновские ГеоЭС с установленной мощностью 62 МВт [1, 3]. Гигантские запасы геотермальной энергии в земной коре $14 \cdot 10^{21}$ Дж (в диапазоне глубин от 3 до 10 км) остаются неосвоенными из-за невозможности создания EGS (Enhanced Geothermal Systems, искусственно создаваемых геотермальных циркуляционных систем [4]), хотя в природных условиях такие системы формируются на наших глазах активными вулканами по механизму магматического фринкинга [3]. С этим же связаны проблемы разработки вулканогенных нефтегазовых резервуаров



сложного строения, а также вопросы размещения радиоактивных отходов (РАО) в кристаллических массивах горных пород, прорванных дайковыми комплексами. Немаловажными являются и вопросы вулканической опасности и необходимости прогноза катастрофических извержений наиболее активных вулканов (Шивелуч, Безымянный, Ключевской и Карымский на Камчатке [5]). Ключевская группа вулканов (КГВ) вызывает огромный интерес как активная природная лаборатория по формированию даек и силлов в режиме реального времени с возможностью их хронологии и 3D-визуализации по сейсмическим и петрологическим данным. В последние годы отмечается активная публикационная деятельность по этому направлению, как на примерах вулканотектонических событий [6-8], так и на примерах извержений вулканов [9, 10].

КГВ включает действующие вулканы Ключевской, Крестовский, Ушковский, Безымянный (рис.1) 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 метрических тонн базальтов в год, или 1/4 от общего годового количества магмы всех 70 вулканов Курило-Камчатского вулканического пояса [11].

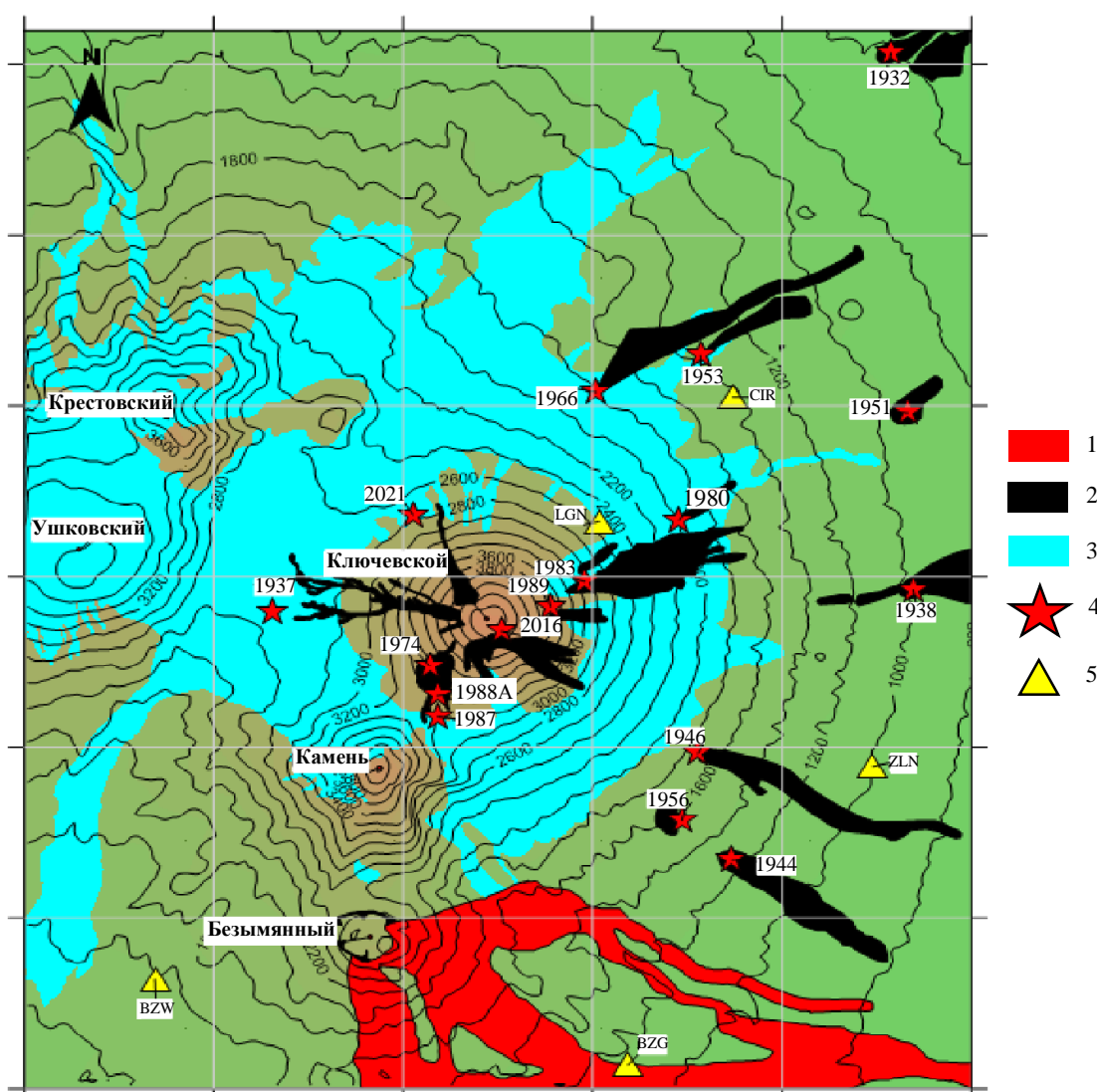


Рис.1. Геологическая схема Ключевской группы вулканов ([12, 13]); разметка осей 5 км

- 1 – отложения извержения вулкана Безымянный 1956 года;
- 2 – лавовые потоки Ключевского вулкана и его побочных извержений (1938-2021 гг.);
- 3 – ледники; 4 – побочные шлаковые конусы с номерами,
- соответствующими году образования; 5 – радиотелеметрические сейсмические станции



Ключевская группа вулканов является объектом детальных сейсмологических и вулканологических наблюдений с 1935 г., результаты которых описаны в работах Б.И.Пийпа, А.Н.Сирина, А.И.Фарберова, М.И.Зубина, И.В.Мелекесцева, Л.Б.Славиной, А.П.Хренова, Н.А.Жаринова, Е.И.Гордеева, В.Н.Чеброва, А.Ю.Озерова, Ю.В.Демянчука, И.Ю.Кулакова, Н.М.Шапиро и многих других.

Методы. Теория проточных магматических камер для КГВ представлена в работе [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 [14], где подразумевается существование стабильных коровых магматических камер под Ключевским вулканом на глубинах 3-0 и 33-25 км (объем 100 км³).

В последние годы данные о динамике питания/дренирования магматических систем Ключевского вулкана были получены с помощью методов сейсмической томографии [15-17]. Сейсмическая томография, выявляющая изменения в трехмерном распределении отношения скоростей продольных и поперечных волн V_p/V_s , предполагает его увеличение с увеличением доли магматического расплава под вулканами. Связь обнаруженных аномалий с магмой подтверждается тем, что во время извержений Ключевского и Безымянного вулканов в 2005 г. наблюдалось увеличение V_p/V_s . Результаты сейсмической томографии сопоставлялись с данными дистанционного зондирования и петрологическими данными для выявления проявлений преэруптивных процессов [18]. Регистрация длиннопериодных вулканических землетрясений позволяет оценить фазовые преобразования в магматических очагах, предшествующие извержениям вулканов [19].

Применение геохимических методов для исследования магматических систем Ключевского вулкана дало следующие результаты. Изучение расплавных включений во вкрапленниках оливина из базальтов выявило концентрацию H₂O в родительских магмах Ключевского вулкана 3,5 мас. %, диапазон измеренных содержаний CO₂ варьирует от 0,01 до 0,13 мас. % [20]. Продукты извержения Ключевского вулкана значительно различаются по составу (52,0-55,5 мас. % SiO₂) и подразделяются на высокомагнезиальные базальты и высокоглиноземистые андезиты. Высокомагнезиальные базальты с более низким содержанием К и более высоким содержанием Mg (>9 мас. % MgO) имеют петрологические характеристики, указывающие на то, что они могут быть первичными или близкими к первичным мантийным магмам. Скопление газов в верхней части магматического канала приводит к преобладанию стромболианских извержений на вершине и объемных лавовых излияний на нижних уровнях [12].

Метеорологические/гидрологические методы, ориентированные на выявление связи вулканической активности с условиями притока метеорных вод, могут быть применимы к КГВ. Ледники и атмосферные осадки способствуют проникновению метеорной воды в остывающие магматические камеры, возможно, влияя на периодичность и объем вулканических извержений [21, 22].

Для выяснения хронологии и 3D-геометрии инъекций даек и силлов в постройке и фундаменте Ключевского вулкана в 2003-2021 гг. в данном исследовании был использован метод Frac-Digger [1], [3]. Метод Frac-Digger применяется для выявления и хронологии плоско-ориентированных кластеров гипоцентров микроземлетрясений (MEQ), которые интерпретируются как инъекции магмы в виде даек и силлов. Дополнительно использованы данные по геохимической истории продуктов извержений для отслеживания уровней инъекций магмы из исходных магматических камер Ключевского вулкана [12].

В данной работе глубинный коровый магматический резервуар Ключевского вулкана обозначается «К2», малоглубинный периферический магматический очаг обозначается «К1». На двухмерных геомеханических моделях [23] показано, что в малоглубинных магматических камерах формируются рои наклонных даек, а инъекции магмы из глубоких магматических очагов формируют субвертикальные дайки. Для классификации магматических инъекций используется угол падения, так что при углах падения более 70° речь идет о дайках, от 20° до 70° – о наклонных дайках (D), а менее 20° – о силлах (S) [24].

**Метод идентификации плоско-ориентированных кластеров (Frac-Digger и Frac-Digger2).**

Предполагается, что инъекции магмы в хрупкой среде под действующими вулканами аналогичны закачке флюидов в скважины в режиме гидроразрыва вмещающих горных пород с генерацией микроземлетрясений (МЕQ) вдоль плоскостей активных сдвиговых трещин.

Выявление плоско-ориентированных кластеров МЕQ проводилось с помощью программы Frac-Digger. Краткое описание алгоритма: на каждой итерации из исходного списка удаляется первый элемент кластера. Для включения нового элемента (сейсмического события) в кластер используются следующие критерии: 1 – разность времени δt ; 2 – разность расстояний в горизонтальной плоскости δR ; 3 – требование почти плоской ориентации (т.е. отклонение гипоцентра до плоскости аппроксимации) δZ . Если полученный кластер содержит более N элементов, то он считается завершенным и добавляется в список плоско-ориентированных кластеров. Все элементы результирующего кластера удаляются из исходного списка элементов (в случае, когда размер кластера $>N$). Эта процедура повторяется до тех пор, пока исходный список элементов не будет исчерпан.

Расчет параметров плоско-ориентированного кластера производится на основе списка элементов. Каждый элемент i содержит координаты (x_i, y_i, z_i) . Для N (количество элементов в кластере) точек с координатами (x_i, y_i, z_i) можно применить уравнение аппроксимирующей плоскости $z = ax + by + c$ с помощью метода наименьших квадратов. Таким образом решение сводится к решению системы линейных уравнений в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum x_i y_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i z_i \\ \sum y_i z_i \\ \sum z_i \end{bmatrix}.$$

Затем эти уравнения решаются с помощью правила Крамера. Таким образом, получаем коэффициенты a, b, c для уравнения плоскости, которое определяется как $z = ax + by + c$. Следующим шагом является нахождение единичного вектора, нормального к аппроксимирующей плоскости $n = (a/\Delta, b/\Delta, -1/\Delta)$, где Δ – определитель системы уравнений, в результате которых получаются следующие геологические параметры: угол падения $\beta = \arccos(1/\Delta) \cdot 180/\pi$ и азимут падения $\alpha = \arctan(a/b) \cdot 180/\pi$. Анализ чувствительности данного алгоритма, в котором плоско-ориентированные кластеры отбираются по критериям временной и пространственной близости, показывает, что указанные критерии дают результаты отбора, обоснованные как физически, так и геологически [1, 3].

Программа Frac-Digger2 дополняет программу Frac-Digger, анализируя все возможные варианты построения продуктивных (или сейсмогенных) разломов и горизонтов по набору продуктивных зон (гипоцентров землетрясений). В Frac-Digger2 выборка из множества точек в трехмерной пространственной области производится случайным образом (по методу Монте-Карло). Это позволяет избежать зависимости решения от упорядоченности исходного набора точек по времени, что крайне важно при трехмерном анализе распределения продуктивных зон и выявлении активных (продуктивных) разломов. Для проверки ориентации плоскости кластера, K -точек и расчета параметров аппроксимирующей плоскости используется тот же метод и те же параметры (δz и δR), что и в Frac-Digger. Если проверка прошла успешно, то неиспользуемые точки исходного множества, удовлетворяющие критерию ориентации кластера на плоскость, добавляются в кластер. Затем проверяются все оставшиеся точки исходного набора данных на возможность их добавления в кластер. Критерии окончания выделения кластеров: максимальное количество включенных в него точек; максимальная сумма атрибутивных параметров точек (которыми могут быть магнитуды землетрясений, расходы продуктивных зон и другие параметры в зависимости от задачи); время, заданное в программе для выполнения процедуры выделения плоско-ориентированного кластера точек.

При поиске K -элементов из списка, состоящего из N элементов, максимальное количество уникальных генераций C_N^K ограничено временем итерации, поэтому для подтверждения достоверности выявленных продуктивных (сейсмогенных) разломов выполняется несколько прогонов программы.

Исходные данные. Эруптивная деятельность вулкана Ключевской в 2003-2021 гг. Извержения вулкана Ключевской с 2003 по 2021 гг. (рис.2, табл.1) представлены по информации



Камчатского филиала Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы Российской академии наук (КФ ФИЦ ЕГС РАН) и опубликованным работам [25-28]. Для истории продуктивности Ключевского вулкана с 2000 по 2020 гг. также использованы данные теплового дистанционного зондирования.

Эруптивная активность показана интервалами времени 1, 2, в течение которых происходили извержения вулкана Ключевской (рис.2), зарегистрированные КФ ФИЦ ЕГС РАН и с помощью дистанционного спутникового мониторинга тепловой мощности (https://www.mirovaweb.it/?country_id=4). График эруптивной активности приведен по оценкам дистанционного спутникового мониторинга [29]. Накопительный график выделения сейсмической энергии в постройке Ключевского вулкана до глубины –3 км создан по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН и ГС РАН (<http://www.gsras.ru/zr/contents.html>).

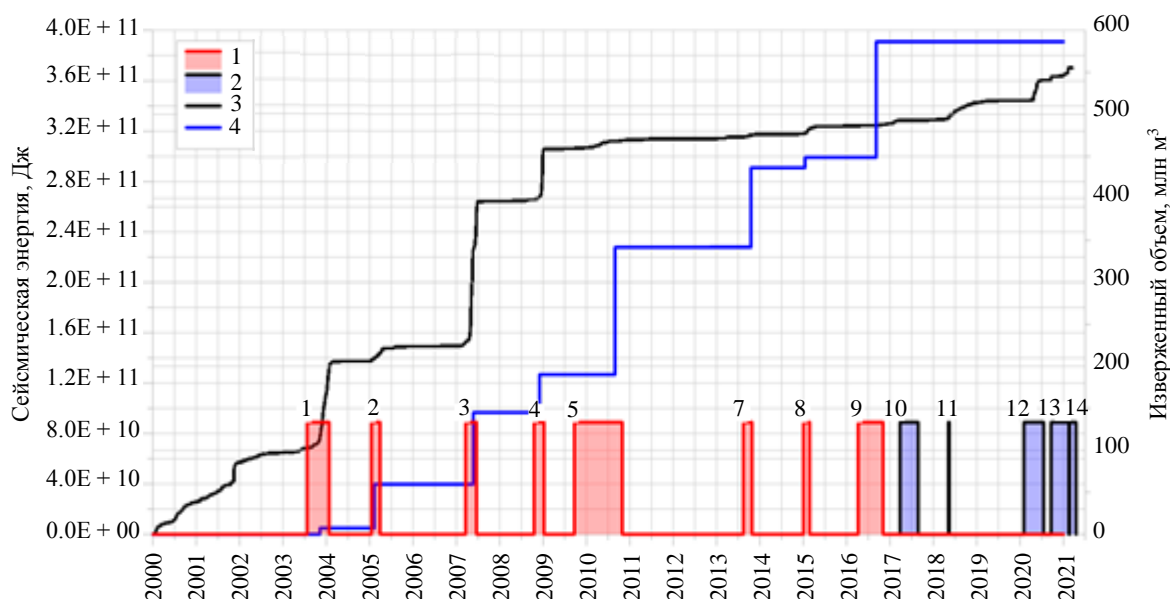


Рис.2. Эруптивная и сейсмическая активность вулкана Ключевской в 2000-2021 гг.

1 – интервалы извержения по данным [29];
 2 – интервалы извержения по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН;
 3 – выделение сейсмической энергии; 4 – эруптивная активность

Таблица 1

Извержения вулкана Ключевской 2003-2021 гг.

Номер извержения	Начало	Окончание	Продолжительность, сут	Пик
1	28.10.2002	27.02.2004	487	26.01.2004
2	12.01.2005	28.04.2005	106	13.04.2005
3	15.12.2006	27.07.2007	224	24.06.2007
4	04.06.2008	01.02.2009	242	04.01.2009
5	30.07.2009	07.12.2010	495	04.07.2010
7	15.08.2013	19.12.2013	126	28.10.2013
8	24.12.2014	10.05.2015	137	02.03.2015
9-10	01.04.2016	25.08.2017	511	16.03.2017
11	06.05.2018	18.05.2018	12	18.05.2018
12	02.02.2020	17.07.2020	166	08.06.2020
13-14	17.09.2020	16.04.2021	211	26.09.2020, 08.03.2021

Примечание. Пики эруптивной активности 1-5, 7-10 по источнику [29]; 11-14 – по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН.



Извержение № 1, 28.10.2002 – 27.02.2004; пик извержения 26.01.2004 определен по совокупности тепловой съемки и выделения сейсмической энергии (рис.2); 21.03.2003 – первые слабые пепловые выбросы высотой 200 м; 15.04.2003 – выбросы пепла высотой 500 м; 15.05.2003 – впервые зафиксирована термальная аномалия; 17.05.2003 – начало свечения над кратером; в ноябре-декабре зафиксированы максимальная амплитуда вулканического дрожания, максимальные пепловые выбросы высотой до 2,5 км над кратером и наибольший размер термальной аномалии; 26.01.2004 началось резкое уменьшение амплитуды вулканического дрожания и размера термальной аномалии. Излияния лавовых потоков на склоны вулкана в течение извержения не отмечено. Объем извержения 7,3 млн м³ [29], выделенная сейсмическая энергия 65,2 ГДж (рис.2).

Извержение № 2, 12.01.2005 – 28.04.2005; пик извержения 13.04.2005 определен по совокупности тепловой съемки и выделения сейсмической энергии (рис.2); 15.01.2005 – появление термальной аномалии; 16.01.2005 – начало свечения в кратере; 21.01.2005 – первый выброс бомб и пепловые шлейфы; 7.02.2005 – начало излияния лавового потока на северо-западный склон вулкана протяженностью несколько километров. В течение двух месяцев наблюдались излияние лавы и выбросы пепла на высоту до 4 км над кратером; 7.04.2005 уровень дрожания резко упал; 11.04.2005 начали регистрироваться единичные землетрясения с глубины 30 км; 29.04.2005 уровень сейсмичности стал фоновым. Объем извержения 52,3 млн м³ [29], выделенная сейсмическая энергия 7,8 ГДж (рис.2).

Извержение № 3, 15.12.2006 – 27.07.2007; пик извержения 24.06.2007 определен по совокупности тепловой съемки и выделения сейсмической энергии (рис.2); 15.12.2006 – появление термальной аномалии; 15.02.2007 – первые слабые пепловые выбросы высотой до 300 м; 28.03.2007 – начало излияния лавового потока по Крестовскому желобу; с 15.04.2007 по 26.06.2007 – максимальные амплитуды вулканического дрожания и максимальные вулканические события – пепловые шлейфы протяженностью несколько тысяч километров распространялись в разные стороны в зависимости от направления ветра на высоте 10-12 км над уровнем моря, излияние трех лавовых потоков длиной несколько километров на северо-западный, северо-восточный и юго-восточный склоны вулкана; в течение июля амплитуда вулканического дрожания значительно уменьшилась, а пепловые выбросы и излияние лавовых потоков прекратилось. Объем извержения 85,4 млн м³ [29], выделенная сейсмическая энергия 111,0 ГДж (рис.2).

Извержение № 4, 04.06.2008 – 01.02.2009; пик извержения 04.01.2009 определен по совокупности тепловой съемки и выделения сейсмической энергии (рис.2); 13.06.2008 – появление термальной аномалии; 08.10.2008 – появление свечения в кратере; 21.10.2008 – начало излияния лавового потока по северо-западному склону; 04.12.2008 – первые пепловые выбросы; январь 2009 г. – уменьшение и прекращение вулканической активности. Объем извержения 45,2 млн м³ [29], выделенная сейсмическая энергия 38,2 ГДж (рис.2).

Извержение № 5, 30.07.2009 – 07.12.2010; пик извержения 04.07.2010 определен по совокупности тепловой съемки и выделения сейсмической энергии (рис.2); 02.08.2009 – появление активности в виде всплесков горячей магмы в кратере; в дальнейшем до конца 2009 г. в вершинном кратере вулкана Ключевской фиксировалась вулканическая активность в виде всплесков магмы и слабых пепловых выбросов высотой не более 300 м; в 2010 г. продолжение вершинного извержения, сопровождавшегося мощными пепловыми выбросами высотой до 9 км над уровнем моря и излиянием нескольких лавовых потоков протяженностью несколько километров; в конце 2010 г. извержение постепенно прекратилось. Объем извержения 151,5 млн м³ [29], выделенная сейсмическая энергия 4,3 ГДж (рис.2).

Извержение № 7, 15.08.2013 – 19.12.2013; пик извержения 28.10.2013 определен по совокупности тепловой съемки и выделения сейсмической энергии (рис.2). С 15.10.2013 по 19.10.2013 – рост непрерывного вулканического дрожания до 246 мкм/с; 19.10.2013 – мощный пирокластический поток в северо-западном направлении (по Крестовскому желобу); по спутниковым данным термальные аномалии и пепловые шлейфы различной высоты; 20.10.2013 – уменьшение вулканической и сейсмической активности; 07.11.2013 – вновь усиление вулканической и сейсмической активности, парогазовая деятельность и пепловые шлейфы по спутниковым данным. Объем извержения 94,6 млн м³ [29], выделенная сейсмическая энергия 1,5 ГДж (рис.2).



Извержение № 8, 24.12.2014 – 10.05.2015; пик извержения 02.03.2015 определен по совокупности тепловой съемки и выделения сейсмической энергии (рис.2); 25.01.2015 – непрерывное вулканическое дрожание до 5,36 мкм/с; пепловые выбросы до 8000 м над уровнем моря; шлейф на восток, северо-восток; свечение над кратером в темное время суток; по спутниковым данным термальные аномалии и пепловые выбросы; 27.01.2015 – непрерывное вулканическое дрожание до 3,61 мкм/с. В поселке Ключи наблюдалось выпадение пепла; по спутниковым данным пепловое облако размером 54 км × 6 км в 145 км к северо-востоку от вулкана на высоте 5800 м над уровнем моря; 14.02.2015 – непрерывное вулканическое дрожание до 4,18 мкм/с; пепловые выбросы на высоту до 7000 м над уровнем моря; шлейф на северо-восток. Объем извержения 12,3 млн м³ [29], выделенная сейсмическая энергия 4,1 ГДж (рис.2).

Извержения № 9-10, 01.04.2016 – 25.08.2017; пик извержения 16.03.2017 определен по совокупности тепловой съемки и выделения сейсмической энергии (рис.2); 07.07.2016 – непрерывное вулканическое дрожание до 4,48 мкм/с; пепловый выброс на высоту 10000 м над уровнем моря; 03.09.2016 – непрерывное вулканическое дрожание до 4,69 мкм/с; пепловые выбросы до 5300 м над уровнем моря; шлейф на юг. 06.09.2016 – непрерывное вулканическое дрожание до 5,45 мкм/с; в темное время суток наблюдается свечение над кратером и лавовыми потоками; 08.09.2016 – непрерывное вулканическое дрожание до 6,07 мкм/с; 10.08.2017 – пепловые выбросы 5500-7000 м над уровнем моря; шлейф на юго-запад протяженностью 50 км. Объем извержения 137,8 млн м³ [29], выделенная сейсмическая энергия 2,9 ГДж (рис.2).

Извержение № 11, 06.05.2018 – 18.05.2018; пик извержения 18.05.2018 определен по выделению сейсмической энергии (рис.2); 14.05.2018 количество событий в постройке вулкана – 192; непрерывное спазматическое вулканическое дрожание до 0,08 мкм/с; свечение над кратером, высота парогазовой деятельности (ПГД) – 1500 м; пепловый выброс на высоту 10000 м над уровнем моря; пепловый шлейф протяженностью 100 км на северо-восток на высоте 7500 м над уровнем моря. Выделенная сейсмическая энергия в течение пяти месяцев после начала извержения составила 12 ГДж (рис.2).

Извержение № 12, 02.02.2020 – 17.07.2020; пик извержения 08.06.2020 определен по выделению сейсмической энергии (рис.2); 09.04.2020 непрерывное спазматическое вулканическое дрожание до 23,86 мкм/с; парогазовые выбросы с содержанием пепла до 7000 м над уровнем моря; в темное время суток наблюдается интенсивное свечение в кратере; пепловый шлейф протяженностью 50 км на юг-юго-восток на высоте 7000 м над уровнем моря. Выделенная сейсмическая энергия в течение двух последних месяцев извержения составила 16 ГДж (рис.2).

Извержение № 13, 27.09.2020 – 14.02.2021; пик извержения 27.09.2020 определен по выделению сейсмической энергии (рис.2); 02.12.2020 – непрерывное спазматическое вулканическое дрожание до 22,28 мкм/с; пепловый выброс на высоту 7000 м над уровнем моря; 07.12.2020 – непрерывное спазматическое вулканическое дрожание до 53,54 мкм/с; 24.01.2021 – непрерывное спазматическое вулканическое дрожание до 2,78 мкм/с; в темное время суток наблюдается свечение над кратером и свечение лавового потока на юго-восточном склоне вулкана. Парогазовый шлейф с содержанием пепла распространился на 94 км на северо-восток от вулкана на высоте 8000 м; 05.02.2021 г. – непрерывное спазматическое вулканическое дрожание до 33,31 мкм/с. Выделенная сейсмическая энергия в начале извержения составила 16 ГДж (рис.2).

Извержение № 14, 20.02.2021 – 16.04.2021; пик извержения 08.03.2021 определен по выделению сейсмической энергии (рис.2). В конце февраля 2021 г. и начале марта 2021 г. регистрировалось слабое непрерывное спазматическое вулканическое дрожание до 1,46 мкм/с. В темное время суток наблюдается свечение на северо-западном склоне вулкана из побочного прорыва и свечение над лавовыми потоками. Выделенная сейсмическая энергия в январе 2021 г. составила 7 ГДж (рис.2).

Применение метода Frac-Digger для оценки магматической деятельности Ключевского вулкана, предшествующей его извержениям в 2003-2021 гг. Расчетные геометрические характеристики и временные последовательности магматических инъекций, предшествующих одиннадцати извержениям вулкана Ключевской (см. табл.1, рис.2), получены с помощью программы Frac-Digger [1, 3] на основе сейсмологических данных КФ ФИЦ ЕГС РАН за период 01.01.2000 –



16.03.2021. Всего с помощью локальной сети телеметрических станций было зарегистрировано 94598 событий. Для определения гипоцентров микроземлетрясений (МЕQ) КФ ФИЦ ЕГС РАН применялась 1D девятислойная модель [30]. К 2000 г. функционировало девять телеметрических станций, затем были развернуты дополнительные станции в 2003 (1), 2005 (3), 2006 (2), 2007 (2), 2009 (1) и 2011 (1) годах. Таким образом с 2011 г. в режиме онлайн работало 19 телеметрических станций. Средняя точность 3σ определения местоположения МЕQ оценивается в 3,1 км с 2010 по 2020 гг. В программе Frac-Digger использовались следующие критерии отбора плоско-ориентированных кластеров гипоцентров МЕQ: $\delta Z = 1$ км (σ – стандартное отклонение от плоскости); $\delta R = 12$ км; $\delta t = 30$ сут; $N = 6$. Общее количество инъекций магмы, обнаруженных за 2000-2021 гг. составило 1523, что включает 92842 плоско-ориентированных гипоцентров МЕQ (98,1 % от общего числа).

Термин «предшествующий» означает временной интервал от нескольких месяцев (от одного до четырех, в одном случае – до девяти) до пика извержения. В данной работе дайки и силлы с числом $N_2 \geq 100$ плоско-ориентированных МЕQ выделены жирными буквами D и S соответственно.

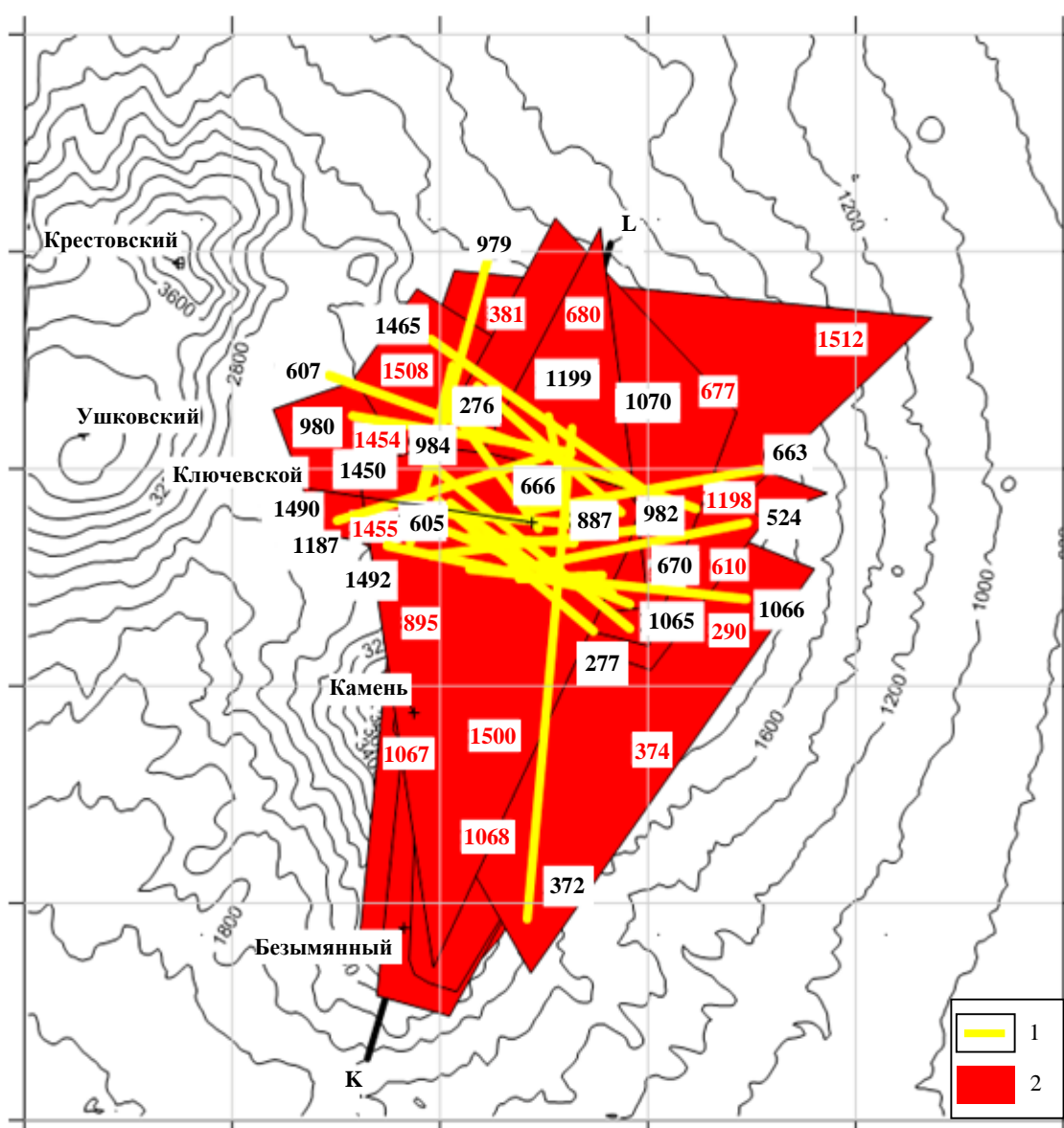


Рис.3. Магматическая активность, предшествующая извержениям вулкана Ключевской в 2003-2021 гг.

Номера даек (черные) и силлов (красные) соответствуют табл.2; разметка сетки 5 км

1 – следы питающих даек на отметке +1000 м; 2 – проекции неглубоко залегающих силлов

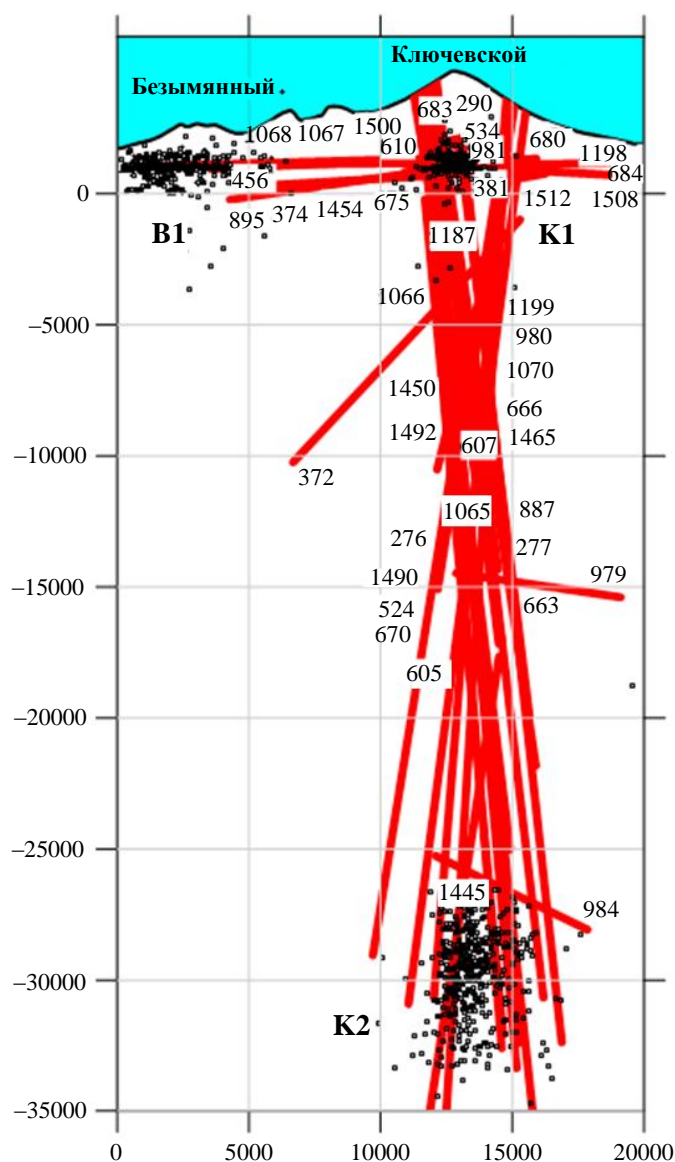


Рис.4. Магматическая активность, предшествующая извержениям вулкана Ключевской в 2003-2021 гг.: следы даек и силлов (номера соответствуют табл.2) в вертикальном сечении по линии KL (см. рис.3).

Кружками обозначены гипоцентры MEQ, расположенные в диапазоне расстояний 1000 м от плоскости сечения KL, размер кружка пропорционален магнитуде землетрясения

Магматическая активность, предшествовавшая индивидуальным извержениям вулкана Ключевской в 2003-2021 гг., показана на рис.3, 4; в табл.2 представлены основные дайки и силлы, предшествующие 11 извержениям вулкана Ключевской в 2003-2021 гг. Всем 11 рассматриваемым извержениям вулкана предшествовали инъекции магмы в виде крутопадающих даек из глубокозалегающего корового магматического очага К2 в малоглубинный периферический магматический очаг К1, дальнейшая магматическая активность включала инъекции даек (с разными углами падения, но с преобладающим азимутом падения на СЗ, С и СВ) из периферического магматического очага К1 и непосредственно перед извержением – силлов из магматического очага К1 (рис.5). При этом отмечается преобладание субширотного и СЗЗ простирания питающих субвертикальных даек из глубокого корового магматического очага К2, предшествовавших индивидуальным извержениям (рис.5). Инъекция силлов (средний угол падения 13°) происходила в диапазоне абсолютных отметок от 250 до 2300 м (среднее значение 1200 м).

Во многих случаях извержения вулкана Ключевской были синхронизированы по времени с извержениями вулкана Безымянный (1 и 1G, 2 и 3 (S374), 3 и 5-6, 4 и 8-9, 5 и 8-9 (D681), 10 и 13, 11 и 15, 13-14 и 17 соответственно). К выводу о синхронизации извержений Ключевского и Безымянного вулканов по данным дистанционной спутниковой термосъемки также пришли авторы работы [29].

Таблица 2

Инъекции магмы (параметры и механизмы), предшествовавшие извержениям Ключевского вулкана 2003-2021 гг. (по сценарию Frac-Digger с параметрами: $\delta Z = 1$ км, $\delta R = 12$ км, $\delta t = 30$ сут, $N = 6$)

Номер извержения	Номер дайки/силла	Угол падения, град	Азимут падения, град	Z, м	Дата инъекции	ML	N2	Механизм инъекции
1	276	86,8	220,1	-16222	18.09.03	2,2	44	К2→К1 дайка
1	277	84,3	38,8	-14864	02.10.03	2,6	80	К2→К1 дайка
1	279	29,9	110,2	1544	01.11.03	2,6	247	К1 дайка
1	280	26,2	60,2	2369	04.11.03	2,6	154	К1 дайка
1	281	50,1	91,1	1170	15.11.03	2,75	162	К1 дайка
1	283	47,8	52,3	1371	01.12.03	2,4	561	К1 дайка



Продолжение табл.2

Номер извержения	Номер дайки/силла	Угол падения, град	Азимут падения, град	Z, м	Дата инъекции	ML	N2	Механизм инъекции
1	284	51,9	53,1	1052	07.12.03	2,35	292	K1 дайка
1	285	72,6	72,6	598	15.12.03	2,5	246	K1 дайка
1	286	77	31,9	250	22.12.03	2,45	140	K1 дайка
1	288	25,2	60,6	777	06.01.04	2,5	497	K1 силл
1	289	53,3	34,7	821	14.01.04	2,35	541	K1 дайка
2	372	79,2	275,4	-4857	06.01.05	2,25	37	K2→K1 дайка
2	374	5	149,1	775	09.01.05	2,45	37	K1 силл
2	381	11,4	218,2	254	12.04.05	1,75	123	K1 силл
3	524	84,8	349,2	-5918	02.03.07	2,2	72	K2→K1 дайка
3	527	76,3	209,4	394	17.03.07	2	133	K1 дайка
3	528	64	359,8	935	22.03.07	2,15	136	K1 дайка
3	529	72,7	62,8	1027	25.03.07	2,4	185	K1 дайка
3	530	81,9	175,5	-1237	06.04.07	2,75	95	K1 дайка
3	531	71,8	277,6	524	10.04.07	2,8	66	K1 дайка
3	532	33,3	60,4	1245	24.04.07	2,95	318	K1 дайка
3	533	65,6	34,5	115	28.04.07	2,95	50	K1 дайка
3	534	26,2	54,6	1814	23.05.07	2,95	242	K1 силл/дайка
4	605	85,3	26,4	-17392	07.10.08	2,2	41	K2→K1 дайка
4	607	85,4	199,2	-13147	21.10.08	2,35	31	K2→K1 дайка
4	609	57,5	355,1	133	17.11.08	3,25	50	K1 дайка
4	610	21,4	136,7	858	12.12.08	2,85	181	K1 силл/дайка
4	611	43,8	355,1	-669	15.12.08	2,75	123	K1 дайка
5	663	84,4	350,3	-10119	03.10.09	2,5	64	K2→K1 дайка
5	666	84,3	52,9	-6494	04.11.09	2,85	23	K2→K1 дайка
5	670	85	357,7	-12493	09.12.09	1,8	20	K2→K1 дайка
5	675	6,2	210,9	1170	25.01.10	1,9	30	K1 силл
5	676	55,1	91,8	964	13.02.10	2,15	54	K1 дайка
5	677	0	356,9	1318	26.02.10	2,2	39	K1 силл
5	678	46,9	20,4	987	28.03.10	2,25	98	K1 дайка
5	679	29,3	165,4	1074	12.04.10	2,5	138	K1 дайка
5	680	5,6	275,1	1125	25.04.10	1,95	19	K1 силл
7	887	83,6	3,1	-19560	18.07.13	2,15	54	K2→K1 дайка
7	895	11	156,6	1203	22.10.13	2	94	K1 силл
8	979	80,5	105,9	-1530	11.01.15	2,25	96	K2→K1 дайка
8	980	81,1	189,1	-748	16.01.15	2,1	107	K2→K1 дайка
8	981	9	94,1	1247	28.01.15	2,15	226	K1 силл
8	984	84,3	104,5	-13408	15.02.15	2	110	K2→K1 дайка
9-10	1065	84,8	20,9	-2805	02.01.17	1,95	219	K2→K1 дайка
9-10	1066	81,1	5,9	-936	06.01.17	1,9	137	K2→K1 дайка
9-10	1067	2,2	124,3	1154	21.01.17	1,8	428	K1 силл
9-10	1068	8,7	117,7	1243	29.01.17	1,85	211	K1 силл
9-10	1070	82,1	38,2	-323	05.02.17	1,8	106	K2→K1 дайка
11*	1187	83,1	353,3	-3140	13.04.18	2,55	480	K2→K1 дайка
11	1198	6,1	183,5	1022	11.05.18	2,15	90	K1 силл
11	1199	83,2	258,3	-21643	12.05.18	2,2	226	K2→K1 дайка



Окончание табл.2

Номер извержения	Номер дайки/силла	Угол падения, град	Азимут падения, град	Z, м	Дата инъекции	ML	N2	Механизм инъекции
12	1445	81,6	209,4	-25707	17.01.20	2,25	41	K2→K1 дайка
12	1450	83,1	35,3	-5616	18.02.20	2,3	42	K2→K1 дайка
12	1454	8,9	69,4	1225	02.04.20	2,4	87	K1 силл
12	1455	3,4	85,1	1132	22.04.20	2,5	372	K1 силл
12	1457	50,3	12,8	750	04.05.20	2,2	133	K1 дайка
13-14	1490	82,4	163,7	-8267	22.08.20	3,3	125	K2→K1 дайка
13-14	1492	83,1	11,5	-1898	25.08.20	2,35	208	K2→K1 дайка
13-14	1500	5,7	136,6	1243	16.09.20	2,2	113	K1 силл
13-14	1508	5	29,9	1234	16.12.20	2,3	108	K1 силл
13-14	1512	10,1	89,3	1071	21.01.21	2,9	272	K1 силл
13-14	1520	31,9	33,4	832	12.02.21	1,6	13	K1 дайка

Примечание. Механизм инъекции магмы определяет родительскую магматическую камеру (K2 или K1), из которой произошла инъекция дайки (силла); Z – среднее значение отметок гипоцентров из кластера гипоцентров; ML – максимальная магнитуда в кластере гипоцентров; N2 – количество гипоцентров землетрясений, синхронизированных с формированием дайки (силла).

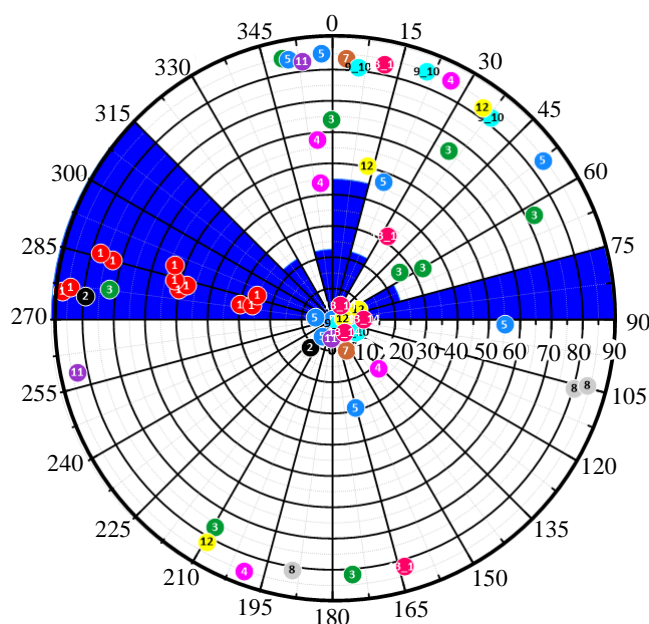


Рис.5. Стереогрaмма даек и силлов (угол падения, азимут падения), предшествующих извержениям Ключевского вулкана (табл.2). Роза-диаграмма отображает простираания питающих даек (K2→K1, табл.2)

Обсуждение результатов. Геомеханическая и геохимическая интерпретация магматической активности и последующих извержений Ключевского вулкана. Механизм извержений. По результатам анализа Frac-Digger общий сценарий магматической деятельности, предшествующей извержениям Ключевского вулкана 2003-2021 гг., можно представить в виде трех этапов (при классификации геомеханического состояния используется терминология источника [31]):

1. Инъекции магмы из глубинного корового магматического очага K2, находящегося в диапазоне глубин от -33 до -27 км, в малоглубинный периферический магматический очаг K1, находящийся в диапазоне глубин от -1,5 до 2 км. Этот процесс проходит в геомеханических условиях горизонтального растяжения с преимущественным направлением C-CCB (SHmax ориентирован по азимуту от -20 до 40°) (рис.5). Канал, по которому происходит транспорт магмы из

нижнего корового магматического очага K1 (-30 км) в верхний периферический магматический очаг K2 (0 км), представляет собой пересечение субвертикальных разломов-даек, сформированных в результате гидроразрыва вмещающих горных пород. Площадь сечения канала на глубине -15 км оценивается в 13,7 км². Анализ условий циркуляции водного теплоносителя в созданной дайками и силлами фильтрационной структуре детально рассматривается в статье [3].

2. В течение нескольких месяцев происходят инъекции даек из периферического магматического очага K1, которые расклинивают постройку вулкана до тех пор, пока локальные геомеханические условия горизонтального растяжения NF не сменятся локальными геомеханическими условиями горизонтального сжатия RF и не начнется формирование силлов на отметках от 250 до 2300 м.



3. Образование силлов на относительно небольшой глубине способствует формированию парогазовых резервуаров высокого давления в конусе Ключевского вулкана; при возрастании давления газовой фазы выше веса перекрывающих горных пород происходит гидротермальный взрыв, прочищающий выводящий канал вулкана и инициирующий пепло-парогазовый режим извержения. После парогазовой продувки канала вулкана возможны фонтанирования и излияния лавы на поверхность.

Циклический геомеханический режим отображается графически динамикой изменения угла падения магматических инъекций (даек и силлов) на рис.6. Значимых геохимических изменений в продуктах извержений Ключевского вулкана в 2000-2021 гг. не наблюдается, за исключением побочного извержения 2021 г., характеризующегося высокими содержаниями некогерентных элементов и изотопами стронция, свидетельствующих об интенсивных магматических процессах в постройке вулкана [32].

Предлагаемый сценарий магматической деятельности Ключевского вулкана может быть дополнен результатами двухмерного геомеханического моделирования распределения поля напряжений (стрессов) вокруг системы из двух жидких источников давления в упругой среде, соответствующих «дуpletу» из двух магматических очагов: глубокому коровому магматическому очагу плоской формы на границе верхней мантии и коры, и неглубоко залегающему магматическому очагу сферической формы [13, 33, 34]. Формирование наклонных даек в верхней части этой модели объясняется как сферической геометрией верхнего очага, так и влиянием наклонного залегания вмещающего массива горных пород на поле напряжений, в результате чего происходит отклонение даек от вертикали по направлению азимута падения массива вмещающих горных пород. Эта модель может объяснить доминирование отклонения падения даек в СВ сектор (рис.5) общим трендом падения массива вмещающих горных пород в фундаменте Ключевского вулкана на СВ.

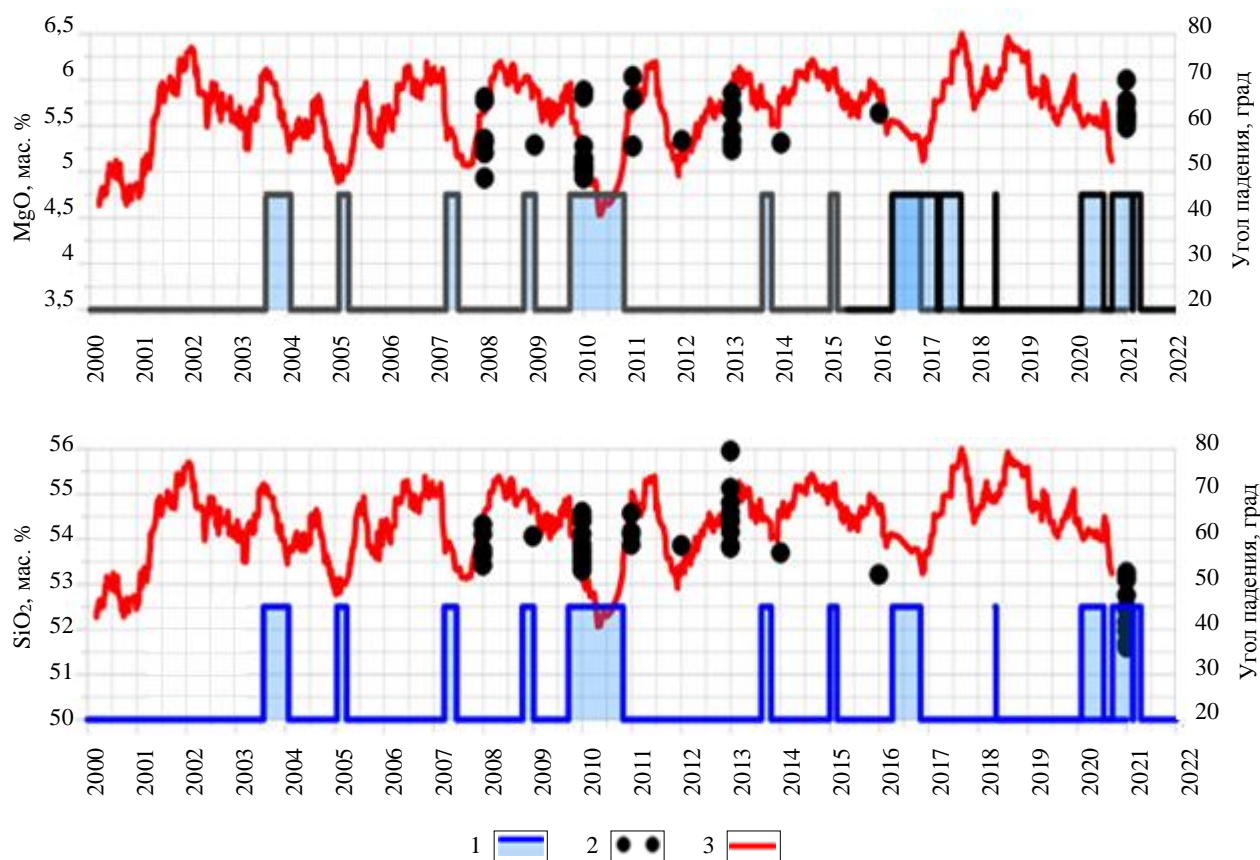


Рис.6. Геохимическая и геомеханическая эволюция Ключевского вулкана в 2000-2021 гг.

Составы магмы взяты из источника [12]

1 – активность Ключевского вулкана (см. рис.2); 2 – массовые доли SiO_2 и MgO ;
3 – индикатор геомеханического состояния – угол падения магматических инъекций (скользящее среднее – 21)



Кроме того, указанная модель показывает возможность инъекции большого количества даек, не достигающих поверхности (arrested dykes), что согласуется с полученной авторами статистикой по Ключевскому вулкану: из 1510 выявленных по сейсмическим данным инъекциям магмы лишь 62 (см. табл.2) предшествовали извержениям Ключевского вулкана (4 %).

Дополнительным возможным механизмом образования силлов может быть заполнение магмой полостей вдоль структурной поверхности подошвы постройки Ключевского вулкана (так называемый механизм отрыва Кука – Гордона для открытия слабого контакта на небольшой глубине в земной коре [33, 35]. Структурная поверхность подошвы постройки Ключевского вулкана на геологических разрезах находится на отметках от 0,5 до 1,5 км [13].

Побочные извержения Ключевского вулкана. Frac-Digger2-анализ распределения лавовых истоков 16 побочных извержений Ключевского вулкана 1932-2021 гг. (табл.3) показывает, что они группируются на двух субгоризонтальных площадках с отметками центров на 1567 и 3374 м (табл.4). Указанные площадки соответствуют направлению гидроразрыва в условиях горизонтального сжатия, которое относится к третьему этапу механизма извержений Ключевского вулкана. Кроме того, нижняя площадка совпадает со структурной поверхностью кровли фундамента Ключевского вулкана [13], что позволяет предполагать формирование большей части побочных прорывов как результат излива магмы из расположенной выше гипсометрически магматической системы, наиболее вероятное при высоком уровне магмы в канале вулкана (максимальный уровень соответствует отметке кратера вулкана около 4850 м над уровнем моря).

Таблица 3

Побочные извержения Ключевского вулкана (объемы и абсолютные отметки извержений по [13, 14])

Побочное извержение	Год	Год*	Отметки, м	Объем, км ³	Продолжительность	Координаты**, м		
						X	Y	Z
Туйла	1932	1932	700-780	0,090	~1 год	612850	6230845	570
Перевальный	1937-1938	1937	2500	0,000		596586	6214061	2690
Билукай	1938-1939	1938	900-1890	0,240	13 мес.	613689	6214621	1030
Юбилейный	1944-1945	1944	1100-1350	0,060	19 сут.	609613	6207168	1185
Апахончич	1946	1946	1620	0,040	29 сут.	609613	6208607	1290
Былинкиной	1951	1951	950	0,010	10 сут.	612411	6219996	1000
Белянкина	1953	1953	1300-1400	0,010	11 сут.	607395	6221295	1430
Вернадского	1956	1956	1400-1450	0,080	5 сут.	608175	6207528	1430
Пийпа	1966-1967	1966	2100	0,080	3 мес.	603639	6219656	2080
IV ВВС	1974	1974	3400-3600	0,025	3 мес.	600662	6212343	3570
8 марта 1980 г.	1980	1980	1800	0,000	7 сут.	607915	6217378	1790
Предсказанный	1983	1983	2875	0,050	~4 мес.	605157	6214901	2900
Предвиденный	1987	1987	2400-3800	0,0002	10 сут.	600921	6210884	3230
XXV ИВ	1988	1988	4000	0,034	6 сут.	600862	6211504	3410
Скуридина	1989-1990	1989	4100	0,033	6 мес.	603902	6214123	3770
Мархинина	2016	2016	4600	0,015	189 сут.			
Горшкова	2021	2021	2850		1 мес.	600254	6216828	2750

* Номер на карте (см. рис.1).

** Принятые координаты центров побочных извержений для расчета ориентации вмещающих плоскостей в программе Frac-Digger2 (X, Y заданы в системе координат UTM WGS84 N57).

Изменения в объемах извержений и геохимической истории продуктов побочных прорывов Ключевского вулкана могут быть частично объяснены изменениями уровня дренирования магматической системы, определяемого по линии пересечения магистральных силлов (табл.4) с топографической поверхностью: на нижних уровнях, соответствующих прорывам 1932, 1937-1939 гг., разгрузились в результате плотностной дифференциации более высокомагнезиальные (магмы с повышенной плотностью до 2920 кг/м³, до 9,5 % вес. MgO), и происходили более объемные



излияния магм. Формирование магистральных силлов побочных прорывов может осуществляться по механизму гидроразрыва в геомеханических условиях RF или по механизму раскрытия слабого контакта (механизм отрыва Кука – Гордона [33]).

Таблица 4

Результаты расчета плоскостей, включающих истоки побочных извержений Ключевского вулкана с использованием программы Frac-Digger2. Параметры Frac-Digger2: $\delta Z = 0,25$ км (σ – стандартное отклонение от плоскости), $\delta R = 12$ км, $N = 5$

Номер извержения	Угол падения, град	Азимут падения, град	X	Y	Z	N2	Год побочного извержения
1	7,0	87,1	607467	6216180	1567	11	1932, 1938, 1937, 1944, 1946, 1951, 1953, 1956, 1966, 1980, 2021
2	19,2	135,9	602301	6212751	3374	5	1974, 1983, 1987, 1988, 1989

Заключение. Извержения Ключевского вулкана 2003-2021 гг. описываются трехстадийным механизмом: извержение № 1 – инжекция магмы по системам субвертикальных даек из нижнего корового магматического очага K2 (–30 км) в верхний периферический магматический очаг K1 (+1 км) (рис.7, а); извержение № 2 – аккумуляция магмы в системе силлов периферического магматического очага K1, дегазация магмы и нагрев метеорной воды с формированием парагазовых геотермальных резервуаров высокого давления, парагазовая эмиссия из кратера вулкана (рис.7, б); извержение № 3 – парагазовая продувка канала вулкана в диапазоне глубин выше +1 км, начало пеплогазовой фазы извержения, переходящей в некоторых случаях в излияние магмы на поверхность.

Структура питающей магматической системы в диапазоне глубин от K2 (–30 км) до K1 (+1 км) включает субвертикальные дайки различного простирания, но с преобладанием двух направлений (субширотного 270°, азимут на вулкан Ушковский) и (ЗЗС 300°, азимут на вулкан Крестовский). Площадь сечения магматического канала, имеющего природу трещин гидроразрыва, около 14 км². Каждому из 11 рассмотренных извержений Ключевского вулкана в 2003-2021 гг. соответствовали индивидуальные магистральные подводящие дайки (от 1 до 3, всего 22) близкого простирания, что указывает на геомеханические условия радиального горизонтального растяжения или горизонтального растяжения по направлению на север или ССВ. Моменты генерации силлов (горизонтальный гидроразрыв) в зоне периферического магматического очага (отметки от 0,25 до 2,3 км) указывают на изменение геомеханического состояния в сторону горизонтального сжатия. Последующее формирование парагазового резервуара за счет дегазации магмы и теплообмена с метеорной водой приводит к возрастанию давления газовой фазы, продувке канала вулкана выше кровли силлов и началу извержения вулкана со сбросом эффективных напряжений. Циклический характер извержений вулкана обусловлен нелинейным термогидродинамическим-геомеханическим взаимодействием «магма – вмещающие горные породы».

Побочные извержения 1932-2021 гг. происходили из системы магистральных долгоживущих силлов (рис.7, в): Силл-1 с центром на отметке +1600 м под СВ склоном вулкана (угол падения 7° на восток) совпадает со структурной поверхностью кровли фундамента Ключевского вулкана, он обеспечивал излияния лавы при извержениях 1932 (Туйла), 1937-1938 (Перевальный), 1938 (Билукай), 1944-1945 (Юбилейный), 1946 (Апохончич), 1951 (Былинкиной), 1953 (Белянкина), 1956 (Вернадского), 1966-1967 (Пийпа), 1980 (8 марта), 2021 (Горшкова); силл-2 с центром на отметке +3400 м под вершиной Ключевского вулкана (угол падения 19° на ЮВ) обеспечивал излияния лавы 1974 (IV ВВС), 1983 (Предсказанное), 1987 (Предвиденное), 1988 (XXV ИВ), 1989-1990 (Скуридина).

Задачей дальнейших исследований является в частности выявление аналогов жильных золото-серебряных и полиметаллических рудных месторождений, углеводородных резервуаров сложного геологического строения для магматической системы Ключевского вулкана. Предлагаемый нами трехмерный метод Frac-Digger2 существенно расширяет возможности двухмерных линементных методик [36] и может быть применен при поисково-разведочных работах рудно-магматических систем Востока России, приуроченных к ядрам гранитоидов в мантийных диапирах [37].

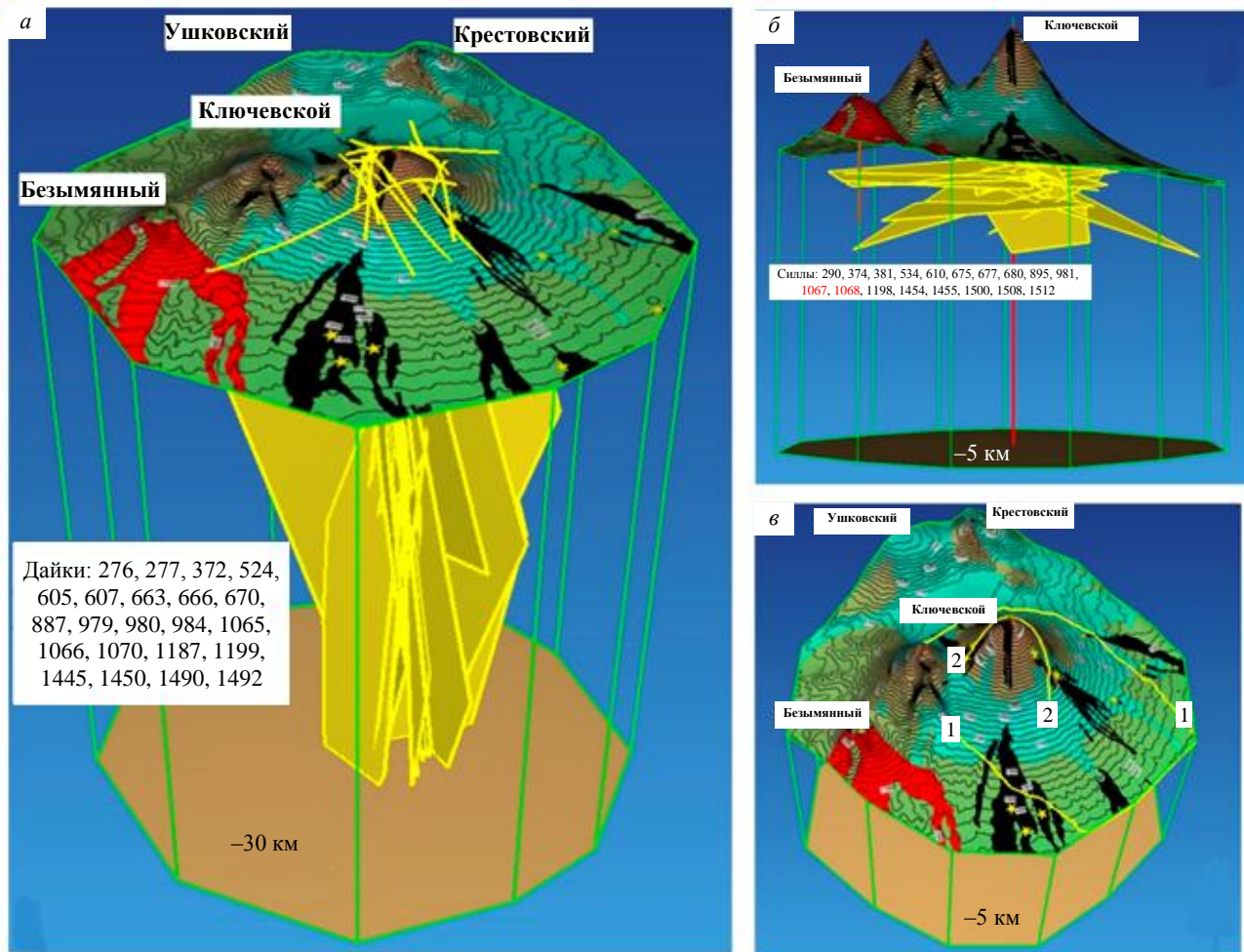


Рис.7. 3D-изображение системы транспорта и аккумуляции магмы в постройке и фундаменте

Ключевского вулкана, предшествующих его извержениям:

а – система субвертикальных даек (см. табл.2), обеспечивающих транспорт магмы из нижнего корового магматического очага К2 в верхний периферический магматический очаг К1; *б* – система силлов (см. табл.2) верхнего периферического магматического очага К1, обеспечивающих парогазовую деятельность вулкана в межпароксизмальный период и продувку канала вулкана перед извержениями;

в – два магистральных силла (см. табл.4), обеспечивающих побочные извержения Ключевского вулкана 1932-2021 гг.

1, 2 – следы усредненной плоскости силлов на топографической поверхности

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://ckpr-rf.ru/usu/507436/>).

Авторы выражают благодарность вулканологам С.А.Федотову, Б.В.Иванову, В.М.Сугробову, А.А.Овсянникову, А.П.Хренову и Ю.В.Демянчуку за содействие, которое способствовало постановке задач, решению которых посвящена статья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирюхин А.В. Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем. СПб: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с.
2. Reed M., Palandri J. Ascent and cooling of magmatic fluids: Precipitation of vein and alteration minerals / Water-Rock Interaction XIII. London: Taylor & Francis Group, 2010. 1008 p.
3. 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. DOI: 10.1134/S020303061804003X



4. Дядькин Ю.Д. Основы геотермальной технологии. Л.: Ленинградский горный институт, 1985. 175 с.
5. Гирина О.А., Гордеев Е.И., Озеров А.Ю. и др. 30 лет Камчатской группе реагирования на вулканические извержения (KVERT) // Материалы XXVI ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы», 30-31 марта 2023, Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2023. С. 34-37.
6. Azizah Al Shehri, Gudmundsson A. Modelling of surface stresses and fracturing during dyke emplacement: Application to the 2009 episode at Harrat Lunayyir, Saudi Arabia // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2018. Vol. 356. P. 278-303. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2018.03.011
7. Drymoni K., Russo E., Tibaldi A. et al. Dyke-induced graben formation in a heterogeneous succession on Mt. Etna: Insights from field observations and FEM numerical models // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2023. Vol. 433. № 107712. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2022.107712
8. Drymoni K., Browning J., Gudmundsson A. Dyke-arrest scenarios in extensional regimes: Insights from field observations and numerical models, Santorini, Greece // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2020. Vol. 396. № 106854. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2020.106854
9. Rivalta E., Taisne B., Bungler A.P., Katz R.F. A review of mechanical models of dike propagation: Schools of thought, results and future directions // Tectonophysics. 2015. Vol. 638. P. 1-42. DOI: 10.1016/j.tecto.2014.10.003
10. Woods J., Winder T., White R.S., Brandsdóttir B. Evolution of a lateral dike intrusion revealed by relatively-relocated dike-induced earthquakes: The 2014–15 Bárðarbunga–Holuhraun rifting event, Iceland // Earth and Planetary Science Letters. 2018. Vol. 506. P. 53-63. DOI: 10.1016/j.epsl.2018.10.032
11. Федотов С.А. Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 455 с.
12. 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. Vol. 172. № 35. DOI: 10.1007/s00410-017-1347-z
13. Озеров А.Ю. Ключевской вулкан: вещество, динамика, модель. М.: Геос, 2019. 306 с.
14. Fedotova S.A., Zharinova N.A., Gontovaya L.I. The Magmatic System of the Klyuchevskaya Group of Volcanoes Inferred from Data on Its Eruptions, Earthquakes, Deformation, and Deep Structure // Journal of Volcanology and Seismology. 2010. Vol. 4. № 1. P. 1-33. DOI: 10.1134/S074204631001001X
15. 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. Vol. 263. P. 75-91. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2012.10.014
16. Koulakov I., Abkadyrov I., Nassir Al Arifi 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. Vol. 122. P. 3852-3874. DOI: 10.1002/2017JB014082
17. Koulakov I., Shapiro N.M., Sens-Schönfelder C. et al. Mantle and crustal sources of magmatic activity of Klyuchevskoy and surrounding volcanoes in Kamchatka inferred from earthquake tomography // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. Vol. 125. № e2020JB020097. DOI: 10.1029/2020JB020097
18. Koulakov I., Plechov P., Mania R. et al. Anatomy of the Bezymianny volcano merely before an explosive eruption on 20.12.2017 // Scientific Reports Springer Nature. 2021. Vol. 19. № 11. № 1758. DOI: 10.1038/s41598-021-81498-9
19. Shapiro N.M., Droznin D.V., Droznina S.Ya. et al. Deep and shallow long-period volcanic seismicity linked by fluid-pressure transfer // Nature Geosciences. 2017. Vol. 10. P. 442-445. DOI: 10.1038/NGEO2952
20. Mironov N.L., Portnyagin M.V. H₂O and CO₂ in parental magmas of Klyuchevskoi volcano inferred from study of melt and fluid inclusions in olivine // Russian Geology and Geophysics. 2011. Vol. 52 (11). P. 1353-1367. DOI: 10.1016/j.rgg.2011.10.007
21. Fournier R.O., Pitt A.M. The Yellowstone Magmatic-Hydrothermal System. Davis, CA, USA: Geothermal Resources Council, 1985. P. 319-327.
22. Sahoo S., Tiwari D., Panda D. et al. Eruption cycles of Mount Etna triggered by seasonal climatic rainfall // Journal of Geodynamics. 2022. Vol. 149. № 101896. DOI: 10.1016/j.jog.2021.101896
23. Gudmundsson A. How local stresses control magma-chamber ruptures, dyke injections, and eruptions in composite volcanoes // Earth-Science Reviews. 2006. Vol. 79. Iss.1-2. P. 1-31. DOI: 10.1016/j.earscirev.2006.06.006
24. Gudmundsson A. Introduction // Volcanotectonics: Understanding the Structure, Deformation and Dynamics of Volcanoes. Cambridge: Cambridge University Press. 2020. P. 1-33. DOI: 10.1017/9781139176217.002
25. Сеньюков С.Л. Мониторинг и прогноз активности вулканов Камчатки по сейсмологическим данным в 2000-2010 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 96-108. DOI: 10.7868/S0203030613010070
26. Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18-40. DOI: 10.7868/S0203030613010021
27. 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. DOI: 10.21455/gr2020.3-5
28. Гирина О.А., Озеров А.Ю., Мельников Д.В. и др. Вулкан Авачинский: мониторинг и основные характеристики извержений // вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы XXII Всероссийской научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 28-29 марта 2019, Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2019. С.11-14.
29. Coppola D., Laiolo M., Massimetti F. et al. Thermal remote sensing reveals communication between volcanoes of the Klyuchevskoy Volcanic Group // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. № 13090. DOI: 10.1038/s41598-021-92542-z
30. Сеньюков С. Активность вулканов Камчатки: мониторинг и прогноз // Наука в России. 2014. № 6 (203). С. 67-75. EDN TFNUST
31. Zoback M. D. Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press, 2010. 448 p.
32. Черкашин Р.И., Бергаль-Кувикас О.В., Чугаев А.В. и др. Условия генерации и источники магм вершинного и побочного извержений вулкана Ключевской в 2020-2021 гг.: изотопно-геохимические (Sr-Nd-Pb-O) данные // Петрология. 2023. Т. 31. № 3. С. 264-280. DOI: 10.31857/S0869590323030032



33. Gudmundsson A. Deflection of dykes into sills at discontinuities and magma-chamber formation // *Tectonophysics*. 2011. Vol. 500. P. 50-64. DOI: [10.1016/j.tecto.2009.10.015](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.10.015)
34. Clunes M., Browning J., Marquardt C. et al. Inclination and heterogeneity of layered geological sequences influence dike-induced ground deformation // *Geology*. 2023. Vol. 51 (3). P. 278-283. DOI: [10.1130/G50464.1](https://doi.org/10.1130/G50464.1)
35. Gudmundsson A. The propagation paths of fluid-driven fractures in layered and faulted rocks // *Geological Magazine*. 2023. Vol. 159. P. 1978-2001. DOI: [10.1017/S0016756822000826](https://doi.org/10.1017/S0016756822000826)
36. Таловина И.В., Крикун Н.С., Юрченко Ю.Ю. и др. Дистанционные методы исследования в изучении структурно-геологических особенностей строения о. Итуруп (Курильские острова) // *Записки Горного института*. 2022. Т. 254. С. 158-172. DOI: [10.31897/PMI.2022.45](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.45)
37. Алексеев В.И. Глубинное строение и геодинамические условия гранитоидного магматизма Востока России // *Записки Горного института*. 2020. Т. 243. С. 259-265. DOI: [10.31897/PMI.2020.3.259](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.3.259)

Авторы: **А.В.Кирюхин**, д-р геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник, AVKiryukhin2@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5468-1452> (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия), **О.В.Бергаль-Кувикас**, PhD, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-0079-507X> (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия), **М.В.Лемзиков**, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0005-4349-6231> (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия), **Н.Б.Журавлев**, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6912-0471> (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.