

Исследования магма-газо-водопроводящих систем вулканов

А.В. Кирюхин

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия
AVKiryukhin2@mail.ru*

Магма-газо-водопроводящие системы вулканов обеспечивают транспорт и аккумуляцию геофлюидных фаз (магма, жидкая вода, газ) в земной коре. В зависимости от режима и условий теплового и водного питания подземные геофлюидные резервуары могут: извергать продукты на поверхность Земли, и (или) формировать геотермальные, гидроминеральные и рудные месторождения. В связи с этим, в данной работе рассматривается: (1) Механическая взаимосвязь извержений вулканов Ключевской и Безымянный; (2) Гидротермальная система под лавовой пробкой Авачинского вулкана; (3) Магматическая активность Мутновского вулкана; (4) Формирование азотных терм в Паратунском грабене; (5) Формирование гидротермальных систем в структуре Корякского вулкана; (6) Циклический режим разгрузки в Долине Гейзеров; (7) Формирование рапассиллов на юге Сибирской платформы.

Ключевые слова: вулкан, магма, газ, вода, транспорт, аккумуляция, месторождение, извержение

Studies of magma-gas-water conducting systems of volcanoes

Alexey V. Kiryukhin

Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Magma-gas-conducting systems of volcanoes provide transportation and accumulation of geofluid phases (magma, liquid water, gas) in the Earth's crust. Depending on the regime and conditions of thermal and water recharge, underground geofluid reservoirs can: erupt products on the Earth's surface, and (or) form geothermal, hydro-mineral and ore deposits. In this regard, this paper examines: (1) The mechanical relationship between the eruptions of Klyuchevskoy and Bezimianny volcanoes; (2) The hydrothermal system beneath the lava plug of Avacha volcano; (3) The magmatic activity of Mutnovsky volcano; (4) Formation of N₂-therms in the Paratunsky graben; (5) Formation of hydrothermal systems in the structure of the Koryaksky volcano; (6) Cyclic mode of discharge in the Valley of Geysers; (7) Formation of rapa-sills in the south of the Siberian Platform.

Keywords: volcano, magma, gas, water, transport, accumulation, deposit, eruption

Механическая взаимосвязь извержений вулканов Ключевской и Безымянный

(Кирюхин и др., 2023а; 2024)

С применением Frac-Digger метода выявлена магматическая активность под Ключевским и Безымянным вулканами в период с 2000 по 2020 гг. 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 Ключевского вулкана (K1, расположенной на глубине от –1 до +2 км). Двумерные численные модели распределения напряжений в условиях наклонного залегания слоев (*Gudmundsson, 2011*) подтверждают такую возможность питания вулкана Безымянный за счет крутопадающих даек из глубинного магматического резервуара Ключевского вулкана K2, а также механизма дебондинга Кука-Гордона (*Gudmundsson, 2006*), открывающего слабый контакт на небольшой глубине для формирования силлов между малоглубинными магматическими резервуарами Ключевского и Безымянного вулканов.

Гидротермальная система под лавовой пробкой Авачинского вулкана (Черных и др., 2024)

Разработана термогидродинамическая TOUGH2-модель гидротермальной системы в конусе Авачинского вулкана. На модели учитывается тепловое питание в основании конуса за счет инъекции силлов и водное питание за счет инфильтрации. В качестве неконденсирующихся газов рассматриваются CO_2 и N_2 . Для калибровки модели использовались значения тепловой разгрузки (фумаролы) и притока/аккумуляции магмы в конус Авачинского вулкана (определенного по сейсмоданным). Результаты моделирования показывают возможность гидротермального взрыва с разрушением лавовой пробки, увеличение доли неконденсирующихся газов может значительно ускорить процесс.

Магматическая активность Мутновского вулкана (Поляков и др., 2024)

Магматическая активность вулкана Мутновский оценивается Frac-Digger методом по сейсмическим данным, она сопровождается притоком магматического газа в эксплуатируемый геотермальный резервуар (фиксируемого по изменениям парциального давления НКГ на конденсаторе МГеоЭС). Это доказывается синхронизацией магматических инъекций (со сдвигом по времени на 1–2 мес.) с аномалиями парциального давления НКГ. По результатам наблюдений 2019–2022 гг. выявлено, что обвалу в северной части кратера вулкана Мутновский 19.08.2021 предшествовала магматическая активность начиная с 04.2020 г (дайки #99–106) и в мае-июне 2021 г (дайки #118–121); фреатический взрыв у скв. 022 синхронизирован с инъекцией дайки #134 в феврале-марте 2023 г.; обвал 06.09.2023 г синхронизирован с инъекцией роя даек #172+.

Формирование азотных терм в Паратунском грабене (Журавлев, 2023; Кирюхин и др., 2024)

В качестве природного объекта для тестирования моделей используется Верхне-Паратунское геотермальное месторождение. Азотные гидротермальные системы характеризуются отсутствием магматического флюидного питания, поэтому их формирование рассматривается на термогидродинамических моделях сквозной проточной циркуляции от области атмосферного водного питания через систему резервуаров-аккумуляторов термальных вод в условиях кондуктивного съема тепла из вмещающих горных пород до зоны разгрузки (жерло потухшего вулкана Горячая Сопка). Показана достаточность R–Z радиально-цилиндрической структуры каналов гидротермальной системы для обеспечения наблюдаемых параметров ее тепловой и массовой разгрузки.

Формирование гидротермальных систем в структуре Корякского вулкана

Нерешенной задачей является асимметричность гидротермальных разгрузок к югу и северу от Корякского вулкана.

Циклический режим разгрузки в Долине Гейзеров (Kiryukhin et. al, 2023b)

Гидротермальная система в Долине Гейзеров является дериватом магматической активности вулкана Кихпинич. Геологические катастрофы в Долине гейзеров (оползень 2007 г. и сель 2014 г.) существенно нарушили покрывку продуктивного гейзерного резервуара. Это изменило режим гейзеров и вызвало сезонную цикличность глубинной разгрузки гидротермальной системы. Термогидродинамическое моделирование воспроизводит наблюдаемое сезонное уменьшение глубинной разгрузки и объясняет это конденсацией газовой фазы в результате инфильтрации холодных поверхностных вод. Последующая термогидродинамическая-химическая модель, объясняет снижение содержания CO_2 в гейзерах, ограничивающее мощность их извержений.

Формирование рапа-силлов на юге Сибирской платформы (Вахромеев и др., 2024)

Показано, что формирование субпластовых залежей предельно насыщенных рассолов обогащенных литием и др. ЦЗМ в карбонатных и терригенно-карбонатных комплексах нижнего палеозоя юга Сибирской платформы может являться результатом пост-магматического транспорта «исходных» рассолов. Сформированные на гигантской территории осадочного чехла вторичные монолитные флюидоупоры (Усольский силл), привели к росту пластовых давлений под силлом, к локализации рассолопотока в жерлах потухших вулканов, и формированию субгоризонтальных трещинных систем природного

гидроразрыва. В последующих мезо-кайнозойских этапах ТМА, процессы перетока и концентрирования рассолов приводили к аккумуляции в них рапы (рапа-силлы). Агентом гидроразрыва могла являться также углеводородная фаза (метан или нефть), при условии их парагенетической связи с исходными залежами редкометальных рассолов.

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 за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00127, <https://rscf.ru/project/23-27-00127/>».

Список литературы

1. Вахромеев А.Г. Моделирование условий формирования рапа-силлов и эксплуатации предельно насыщенных литиеносных рассолов на юге Сибирской платформы / А.Г. Вахромеев, А.В. Кирюхин, А.В. Сергеева, И.В. Литвинова // XXIV Всероссийское совещание по подземным водам Востока России. Екатеринбург. 2024 г.
2. Журавлев Н.Б. Концептуальная модель теплового питания низкотемпературного геотермального месторождения без дополнительных тепловых источников / Н.Б. Журавлев // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа». П-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2023. С. 37–40.
3. Кирюхин А.В. Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем / А.В. Кирюхин // СПб.: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с.
4. Кирюхин А.В. Магматическая система Ключевского вулкана по сейсмическим данным и их геомеханической интерпретации / А.В. Кирюхин, О.В. Бергаль-Кувикас, М.В. Лемзиков, Н.Б. Журавлев // Записки Горного института. 2023. № 263. С. 698–714.
5. Кирюхин А.В. Моделирование условий формирования азотных гидротермальных систем / А.В. Кирюхин, Н.Б. Журавлев // Всероссийское совещание по подземным водам Востока России (XXIV Совещание по подземным водам Востока России) Екатеринбург 21–28 июня 2024 г.
6. Поляков А.Ю. Мониторинг притока неконденсирующихся газов в Мутновский продуктивный геотермальный резервуар в 2019–2023 гг. / А.Ю. Поляков, А.В. Кирюхин // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXIV ежегодной конференции посвященной Дню вулканолога, 27–29 марта 2024 г. П-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2024 г. С. 241–244.
7. Черных Е.В. Моделирование термогидродинамических процессов в конусе Авачинского вулкана / Е.В. Черных, А.В. Кирюхин, О.О. Усачева // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXIV ежегодной конференции посвященной Дню вулканолога, 27–29 марта 2024 г. П-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2024 г. С. 241–244.
8. Gudmundsson A. Deflection of dykes into sills at discontinuities and magma-chamber formation // Tectonophysics. 2011. № 500. P. 50–64.
9. Gudmundsson A. How local stresses control magma-chamber ruptures, dyke injections, and eruptions in composite volcanoes // Earth-Sci. Reviews. 2006. № 79. P. 1–31.
10. Kiryukhin A.V. Magmatic activity of Klyuchevskoy volcano triggering eruptions of Bezymianny volcano based on seismological and petrological data / A.V. Kiryukhin, O.V. Bergal-Kuvikas, M.V. Lemzikov // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2023. V. 442. Art. 107892.
11. Kiryukhin A.V. Modeling of the thermal-hydrodynamic and chemical regime of Geyser reservoir (Valley of Geyser, Kamchatka) / A.V. Kiryukhin, A.V. Sergeeva, O.O. Usacheva // Geothermics. 2023. Vol. 115. P. 102808.