

УДК 552.323

ПАУЖЕТСКАЯ КАЛЬДЕРА (ЮЖНАЯ КАМЧАТКА): ИЗУЧЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ И ПРОИСХОЖДЕНИЯ ОБЪЕМНОГО КИСЛОГО МАГМАТИЗМА¹

© 2022 г. В. О. Давыдова^{a, b, *}, И. Н. Биндеман^{b, c}, М. Д. Щеклеина^{a, b}, С. Н. Рычагов^d

^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Москва, Россия

^bМинералогический музей им. А.Е. Ферсмана, Москва, Россия

^cUniversity of Oregon, Eugene, OR, USA

^dИнститут вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

*e-mail: vestadav@gmail.com

Поступила в редакцию 12.11.2021 г.

После доработки 18.02.2022 г.

Принята к публикации 10.03.2022 г.

Крупнейшее за последний миллион лет эруптивное событие на Камчатке — извержение голыгинских игнимбритов (420–440 тыс. лет назад) — привело к формированию Паужетской кальдеры (27 × 18 км) в южной части полуострова. Извержению голыгинских игнимбритов предшествовал более древний (~3 млн лет) основной и средний вулканизм. После образования Паужетской кальдеры внутри нее формируется широкое разнообразие вулканических продуктов — от базальтов до риолитов. В настоящей работе мы используем геохимические и изотопные данные для выявления процессов, способствующих формированию гигантских объемов кислых магм в относительно тонкой и основной коре Южной Камчатки. Получены макро- и микроэлементные валовые составы пород докальдерных (гора Ключевская, гора Орлиное Крыло) и посткальдерных (Камбальный хребет, Черные скалы) эруптивных центров, синкальдерных голыгинских игнимбритов, а также гидротермально измененных внутрикальдерных отложений. Для голыгинских игнимбритов и ряда посткальдерных вулкаников проанализирован изотопный состав Sr и Nd. Изотопные данные позволяют предполагать незначительно эволюционирующий во времени мантийный источник, плавление которого под воздействием отделяющегося от погружающейся плиты флюида привело к формированию родительских магм для всех пород Паужетского района. Геохимические данные свидетельствуют о доминирующей роли фракционной кристаллизации на уровне нижней–средней части коры в процессе формирования большинства магм Паужетской кальдеры. MELTS-моделирование согласуется с геохимическими наблюдениями и позволяет получить составы голыгинских игнимбритов за счет фракционирования базальтов Камбального хребта с 2 мас. % H₂O при 6 кбар.

Ключевые слова: Паужетская кальдера, кальдерообразующие извержения, игнимбриты, изотопы Sr, изотопы Nd, MELTS-моделирование

DOI: 10.31857/S0869590322050028

ВВЕДЕНИЕ

Крупные кальдерообразующие извержения характеризуются разрушительной силой, приводящей к значительным ландшафтным и климатическим изменениям, в том числе планетарного масштаба (Miller, Wark, 2008; Martin, Bindeman, 2009). Продолжительность непосредственно самих катастрофических извержений в геологических масштабах невелика, однако магматическая активность подобных эруптивных центров не ограничивается суперизвержением и сопутству-

ющим возникновением кальдеры. Формирование, накопление и хранение огромных объемов магм, вовлеченных в подобные события, отражается на до- и посткальдерной эруптивной активности района, а дегазация масштабных магматических очагов отвечает за возникновение долгоживущих гидротермальных систем, превращающих кальдеры супервулканов в крупные гидротермальные и геотермальные месторождения (Cole et al., 2005; Hutter, 2020). Изучение не только продуктов самих кальдерообразующих извержений, но и эруптивных продуктов, извергнутых до и после них, способно значительно расширить наши представления о долгоживущих магматических системах и

¹ Дополнительная информация для этой статьи доступна doi: 10.31857/S0869590322050028 для авторизованных пользователей.

механизмах генерации и накопления огромных объемов магм в коровых очагах (Troch et al., 2017).

Для Камчатки характерно не только обилие современных вулканов, но и многочисленные кальдерные комплексы (например, Bindeman et al., 2010). Сочетание относительно тонкой коры и высокой скорости погружения океанической плиты (~8 см в год, DeMets, 1992) делает Камчатку одним из самых активных островодужных сегментов мира, содержащим наибольшее количество кальдер обрушения на единицу протяженности (Hughes, Mahood, 2008). Отсутствие хороших дорог и сильная залесенность большинства объектов обуславливают слабую изученность кальдер Камчатки. Несмотря на пристальный интерес исследователей в последние десятилетия (Леонов, Rogozin, 2007; Lundgren, Lu, 2006; Bindeman et al., 2010, 2019; Bergal-Kuvikas et al., 2019 и др.), многие кальдеры остаются охарактеризованными лишь в общих чертах, либо с отдельных сторон. Так, Паужетская кальдера – самая южная кальдера полуострова, сформировавшаяся в ходе крупнейшего извержения на Камчатке за последний миллион лет (Bindeman et al., 2010; Ponomareva et al., 2018), рассматривается преимущественно как геотермальное и гидротермальное месторождение (Рычагов и др., 2009, 2012; Феофилактов и др., 2021 и др.), тогда как геолого-геохимическая характеристика района в основном ограничивается работами 30–50-летней давности (Структура ..., 1993; Долгоживущий ..., 1980 и др.).

Изучение Паужетского района началось в 30-х гг. XX в.; с 60-х гг. обсуждались две основные гипотезы, объясняющие формирование крупной отрицательной структуры и особенности магматизма района. Ранние работы предполагают существование плиоценовой вулcano-тектонической депрессии, морфология которой отвечает компенсации миллионов лет извержений основных магм, а кислый магматизм носит подчиненный характер и включает несколько стадий (например, Аверьев, Святловский, 1961; Долгоживущий ..., 1980). Параллельно С.Е. Апрельков представляет первые геологические наблюдения, доказывающие единовременность формирования голыгинских игнимбритов (Апрельков, 1961) и высказывает первые предположения о существовании кальдеры третичного вулкана (устное сообщение, приведено согласно (Аверьев, Белоусов, 1965)). В дальнейшем возраст уточняется до среднеплейстоценового, а предположения о том, что Паужетская кальдера является кальдерой обрушения, сформировавшейся в результате единовременного извержения голыгинских игнимбритов, развиваются (например, Мелекесцев, 1974) и подтверждаются $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датированием игнимбритов (443 ± 8 тыс. лет) в работе (Bindeman et al., 2010). Позднее (Ponomareva et al., 2018) обнаружили тефру данного извержения в отложениях дна Тихого океана и Охотского

моря и, используя детальные возрастные модели осадочных колонок, уточнили временные рамки кальдерообразующего извержения до 421 ± 6.6 тыс. лет.

Расположение игнимбритов вокруг Паужетской кальдеры (Мелекесцев, 1974; Bindeman et al., 2010) однозначно вписывает более молодую кальдеру Курильского озера (самое большое голоценовое извержение на Камчатке, Ponomareva et al., 2004) как вложенную кальдеру. На переплавленные захороненных и гидротермально измененных голыгинских игнимбритов в петрогенезе игнимбритов Курильского озера косвенно указывают низкие значения изотопов кислорода (Bindeman et al., 2004). Однако, несмотря на значительное уточнение геохронологических и геохимических характеристик продуктов кальдерообразующих извержений, многие вопросы – эруптивная история района, наличие или отсутствие генетической связи до-, син- и посткальдерного вулканизма, вероятные источники магм – освещены крайне слабо, преимущественно ограничиваясь масштабами геологической съемки и изучением общих характеристик пород в рамках освоения геотермального Паужетского месторождения. Результаты геологического, в том числе петролого-геохимического изучения Паужетского района приведены в монографиях (Структура ..., 1993; Долгоживущий ..., 1980).

В настоящей работе мы постарались объединить ранее опубликованные данные о геохимии района с новыми химическими и изотопными данными для создания единой непротиворечивой модели происхождения магм Паужетской структуры. Для этого были получены валовые составы пород для ряда ранее детально не рассматриваемых с геохимической точки зрения объектов и для объектов, частичное геохимическое изучение которых проводилось в 80–90-х гг. XX в. Содержания петрогенных элементов и микроэлементов были измерены в породах вулканов Южный и Северный Камбальный, гор Скалистая, Черные Скалы, Орлиное Крыло, Ключевская, а также для вскрытых скважинами разрезов гидротермально измененных пород алнейской серии, голыгинского горизонта и паужетской свиты. Для ряда представительных образцов также были получены изотопные составы стронция и неодима.

Полученные содержания петрогенных элементов, микроэлементов и особенности изотопного состава были использованы для определения наиболее вероятных источников и механизмов происхождения магм Паужетской структуры; термодинамическое моделирование – для подтверждения полученных данных и уточнения P - T - H_2O условий.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Паужетская кальдера представляет собой вытянутую в широтном направлении депрессию размером 27×18 км на южном окончании Камчатского полуострова (рис. 1). Кальдера сформировалась в ходе извержения голыгинских игнимбригов 420–440 тыс. лет назад, которые сохраняются как радиально в окрестностях кальдеры (мощность покровных игнимбригов варьирует от 20–30 до 100 м), так и непосредственно внутри (мощность горизонта измененных туфов, вскрытых скважинами, варьирует от 125 до 190 м). Здесь и далее мы используем термин “голыгинские игнимбриги” для внекальдерных образований и “голыгинские туфы” для внутрикальдерных для более простой их идентификации, не подразумевая генетических различий. Пеплы этого извержения также фиксируются на дне Охотского моря и в северо-западной части Тихого океана (Ponomareva et al., 2018). Оценки минимального общего объема изверженного материала по сумме вне- и внутрикальдерных игнимбригов варьируют от $130\text{--}160$ км³ (Кожемяка и др., 1980; Bindeman et al., 2010) до 450 км³ (Bindeman et al., 2010). Дополнительный объем пеплового материала, выпавшего в ходе извержения, оценивается не меньше чем в 200 км³ (Ponomareva et al., 2018).

Внутрикальдерные голыгинские туфы подстилаются более чем 800 м вулканотерригенными отложениями фундамента (P₃–N₂, здесь и далее возраст и структурное положение приведены согласно (Структура ..., 1993)), подразделяемого на нижележащую анагвайскую и вышележащую алнейскую серии. Алнейская серия сложена вулканогенными и вулканогенно-осадочными породами основного и среднего состава. Морфологически выраженные вулканические постройки, сложенные преимущественно лавами, окаймляют кальдеру с запада и севера, в том числе гора Орлиное Крыло и гора Ключевская. Их ⁴⁰Ag/³⁹Ag возраст (Bindeman et al., 2019) составляет 3.06 ± 0.12 и 2.88 ± 0.01 млн лет соответственно, что значительно древнее возраста формирования голыгинских игнимбригов. Близкие временные рамки (2 млн лет) ранее были получены K–Ar датированием для горы 1002 м (Долгоживущий ..., 1980). В других направлениях борта кальдеры погребены под более молодыми отложениями – кальдерой Курильского озера и потоками влк. Ильинский на северо-востоке, влк. Северный Камбальный на юге (Bindeman et al., 2010; Ponomareva et al., 2018; Мелекесцев и др., 1974; Леонов, 1989). Непосредственно докальдерных (2–0.5 млн лет) вулканитов не обнаружено.

Поздне-плейстоценовая посткальдерная эруптивная деятельность района маркируется серией базальтовых моногенных конусов и двумя риодацитовыми экструзивными куполами – гора Коромысло и гора Плоская (235 ± 41 тыс. лет, ⁴⁰Ag/³⁹Ag воз-

раст получен в работе (Bindeman et al., 2010)). Примерно в это же время за пределами кальдеры формируется Кошелевский вулкан и происходит заложение Камбального хребта (Долгоживущий ..., 1980), вероятно, более молодого, чем вышеупомянутая дацитовая экструзия Плоская (~235 тыс. лет).

В голоцене после окончания ледникового периода вулканическая активность в данном районе сосредоточена в трех основных точках: на юге (влк. Камбальный), в центральной части (влк. Дикий Гребень, подробно рассматривается в работе (Bindeman, Bailey, 1994)) и на северо-востоке (кальдера Курильского озера и влк. Ильинский, подробно рассматривается в работе (Ponomareva et al., 2004)).

Камбальный хребет сложен рядом вулканических построек, протянувшихся в субмеридиональном направлении от влк. Камбальный (Южный Камбальный) на юге до влк. Черные Скалы на севере. История развития и геологическое строение хребта рассматривается в ряде работ (Влодавцев и др., 1957; Литасов, Важеевская, 1991; Долгоживущий ..., 1980; Структура ..., 1993; Ponomareva et al., 2007 и др.). Отдельные исследователи разделяют влк. Камбальный и более древний (возможно, позднеплейстоценовый, согласно (Структура ..., 1993)) влк. Северный Камбальный, территориально расположенный между стратовулканической голоценовой постройкой влк. Камбальный на юге и влк. Черные Скалы на севере (Литасов, Важеевская, 1991; Рычагов и др., 2017a). Согласно (Bindeman et al., 2010), северная часть постройки Камбального хребта (включая экструзию Плоская, ~235 тыс. лет) сформировалась за счет посткальдерного резургентного поднятия, осложненного региональными тектоническими движениями. В дальнейшем магматическая активность продолжилась на юг за пределы кальдеры, что привело к возникновению независимой подводящей системы, не имеющей непосредственной генетической связи с Паужетской кальдерой и связанной с мантийным источником, и формированию влк. Камбальный (Komzeleva et al., 2021).

Лавовые потоки и пирокластические отложения, формировавшиеся за счет деятельности посткальдерных эруптивных центров, заполнили депрессию, сформировав внутрикальдерную паужетскую свиту. Время ее формирования пришлось на период последних оледенений и периодически заполняющегося сингляциального озера (Структура ..., 1993), что отражается в разнообразии отложений. 200–250 м отложений паужетской свиты сложены вулканическими (туфы и) реже, лавовые потоки) и вулканогенно-осадочными породами, в том числе сложенными смесью обломков терригенных осадков и более древних эруптивных продуктов. В настоящей работе мы рассматриваем

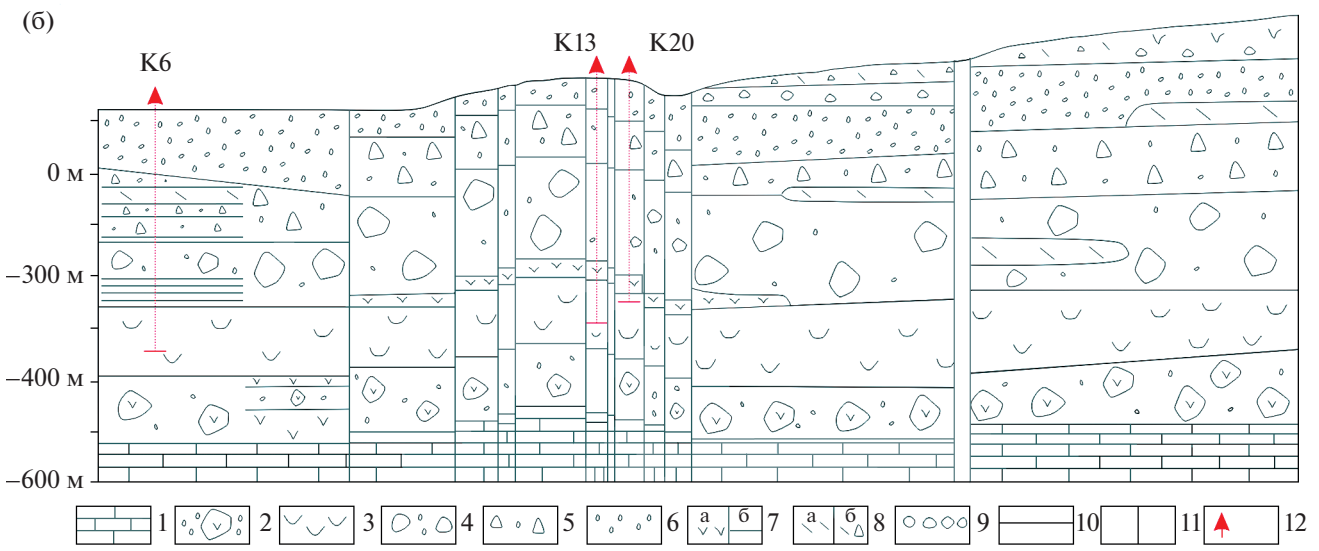
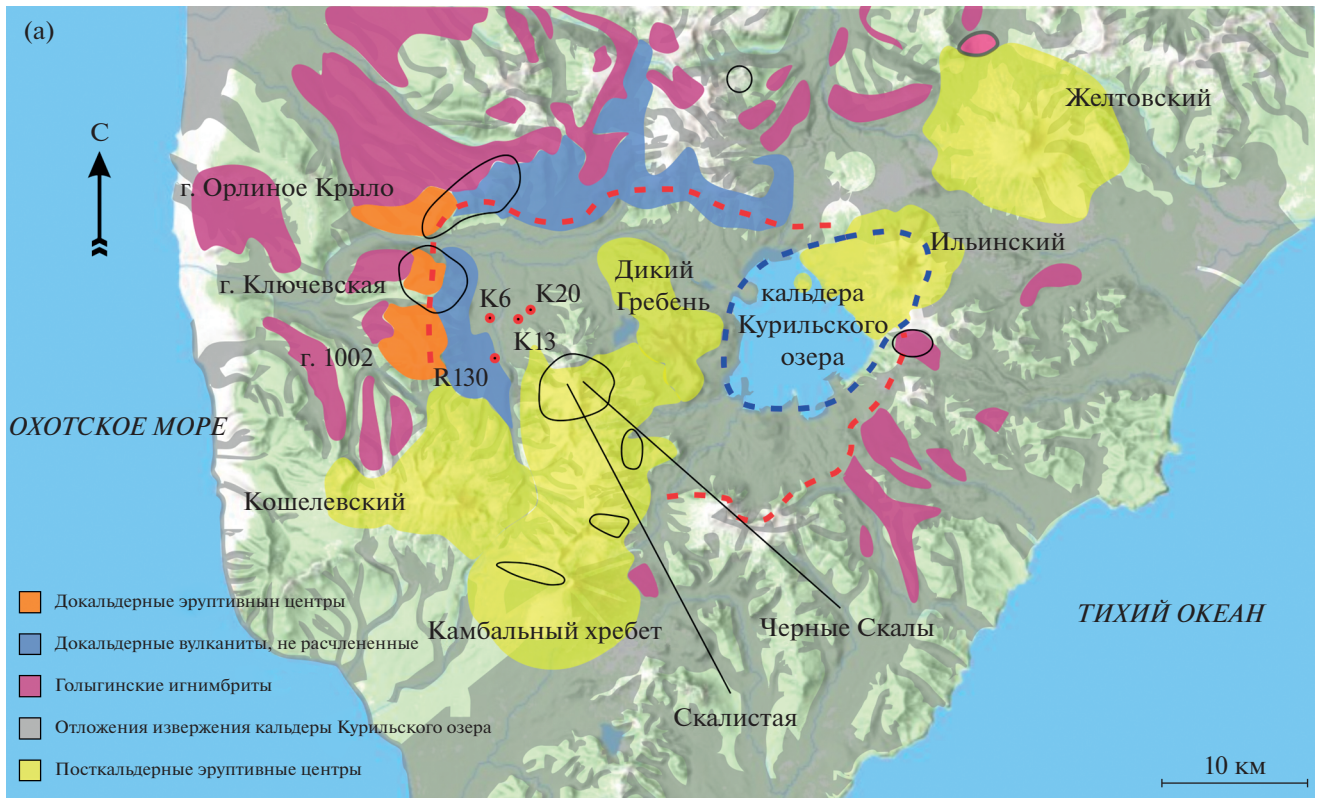


Рис. 1. (а) Схематическая геологическая карта Южной Камчатки и местоположение рассматриваемых объектов. Красная пунктирная линия ограничивает Паужетскую кальдеру, синяя – кальдеру Курильского озера (границы приведены согласно Ponomareva et al., 2004; Bindeman et al., 2010). Красными точками обозначены скважины, черными ореолами – места отбора проб на Камбальном хребте. Границы геологических объектов приведены согласно (Рычагов и др., 2017; Белоусов, 1978), залегание голягинских игнимбритов – (Bindeman et al., 2010), отложения извержения, приведшего к образованию кальдеры Курильского озера, согласно (Ponomareva et al., 2004). (б) Геологический разрез Паужетского геотермального месторождения по (Структура ..., 1993). 1 – вулканомиктовые песчаники основания разреза, анавайская серия; 2 – агломератовые туфы и туфобрекчии андезибазальтового состава, аллейская серия; 3 – голягинский горизонт; 4 – нижнепаужетская подсвита; 5 – среднепаужетская подсвита; 6 – верхнепаужетская подсвита; 7 – андезиты и андезибазальты: а – крупные потоки лав и тела субинтрузивных микродиоритов, б – дайки; 8 – экструзии (а) и лавы (б) дацитов; 9 – лавобрекчии оснований потоков лав и краевых частей экструзивных тел; 10 – литологические и интрузивные границы; 11 – тектонические нарушения; 12 – поисковые и разведочные скважины, из керна которых проводился отбор образцов.

только вулканические породы, отдельные анализы туфопесчаников приведены для ознакомления.

Возраст паужетской свиты моложе 440–420 тыс. лет, однако тот факт, что внутрикальдерные отложения прорываются экструзивными куполами, образовавшимися ~235 тыс. лет назад, например экструзией Плоская (Bindeman et al., 2010), позволяет утверждать, что возраст паужетской свиты древнее остальных рассматриваемых посткальдерных вулканитов, известных на поверхности. Наличие угловых несогласий и размывов задает разделение свиты на три подсвиты – нижне-, средне- и верхнепаужетскую (Структура ..., 1993), на данный момент не привязанных к абсолютному возрасту. В результате активной гидротермальной деятельности значительная часть внутрикальдерных отложений изменена в пропилит-аргиллизитовой фации (Структура ..., 1993; Рычагов и др., 2009).

Образцы. Коллекция образцов пород, слагающих постройки Камбального хребта, гор Ключевская и Орлиное Крыло была отобрана авторами в ходе полевых работ в 1988, 1989, 2012 и 2019 гг. при содействии сотрудников полевого отряда лаборатории геотермии ИВиС ДВО РАН. Стратифицированные внутрикальдерные отложения алнейской серии, паужетской свиты и голыгинского горизонта вскрыты разведочными скважинами Паужетского месторождения. Образцы керн были отобраны из скважин К6, К13, К20 и R130 (рис. 1). По скважине К6 отобран максимально полный разрез – как по литологическим разностям, так и по степени проявленных метасоматических изменений; из скважин К13, К20 взяты образцы лавовых потоков нижнепаужетской подсвиты, из скважины R130 – породы алнейской серии. Из отобранной коллекции для дальнейшего изучения было выбрано 94 уникальных образца, 51 из которых представляют отдельные лавовые и пирокластические потоки, а также слои стратифицированных туфовых отложений алнейской серии, голыгинского горизонта и паужетской свиты; 30 – породы постройки Камбального хребта, 7 – отдельные потоки горы Ключевская и 6 – горы Орлиное Крыло (см. Supplementary, ESM_1.xlsx (Таблица А.1)²).

² В Дополнительных материалах к русской и английской онлайн-версиям статьи на сайтах <https://elibrary.ru/> и <http://link.springer.com/> соответственно приведены: Supplementary: ESM_1.xlsx, Таблица А.1 – Список исследованных образцов; Таблица А.2 – Валовый химический состав пород Паужетского района; Таблица А.3 – Коэффициенты, используемые для сравнения полученных и литературных данных; Таблица А.4 – Валовый химический состав пород Паужетского района, литературные данные; Таблица А.5 – Изотопный состав Sr и Nd.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Валовый химический состав исследуемых образцов (Supplementary, ESM_1.xlsx (Таблица А.2)) был измерен в лаборатории рентгеновских методов анализа в Центре коллективного пользования “Изотопно-геохимических исследований” Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск) с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра S4 Pioneer (Bruker AXS, Германия) по методике для навески 500 мг (Амосова и др., 2015). Содержания микроэлементов определены методом масс-спектрометрии с ионизацией в индуктивно связанной плазме (ICP-MS) на масс-спектрометре с магнитным сектором ELEMENT2 по методике (Perepelov et al., 2007) и Agilent 7700X. Контроль качества анализов проводился с использованием международных стандартных образцов USGS (BHVO-2, AGV-2). В качестве внутреннего стандарта использовался образец C707/6 (Bindeman et al., 2019), для ряда микроэлементов вводились коэффициенты коррекции (см. Supplementary, ESM_1.xlsx (Таблица А.3)).

В работе также использовались данные предыдущих исследователей как по более изученным объектам района: кальдера Курильского озера и влк. Ильинский (Покровский и др., 1999; Bindeman et al., 2004; Ponomareva et al., 2004); влк. Дикий Гребень (Bindeman, Bailey, 1994; Bindeman et al., 2004; Толстых и др., 2003); голыгинским игнибритам и гора Плоская (Bindeman et al., 2010); так и по рассматриваемым нами объектам: паужетская свита (Структура ..., 1993); гора Ключевская, гора Орлиное Крыло, доголыгинские вулканиты (Bindeman et al., 2019).

Изотопный состав Sr и Nd определялся в Даремском Университете, Великобритания на многоколлекторном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой MC-ICP-NEPTUNE по методике (Davidson et al., 2008); в Копенгагенском Университете по методике (Bailey et al., 1993).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Геохимия

Валовый состав (главные и микроэлементы) пород Паужетского района приведен в Supplementary, ESM_1.xlsx (Таблица А.2), использованные для дальнейшей интерпретации литературные данные – в Supplementary, ESM_1.xlsx (Таблица А.4). Геохимические характеристики пород района соответствуют таковым типичных пород надсубдукционных обстановок, занимающих пограничное положение между известково-щелочными и толеитовыми сериями (рис. 2; Pearce, Peate, 1995) – повышенное относительно N-MORB содержание крупноионных литофильных элементов (LILE), легких редкоземельных элементов (La-Sm), U, Th

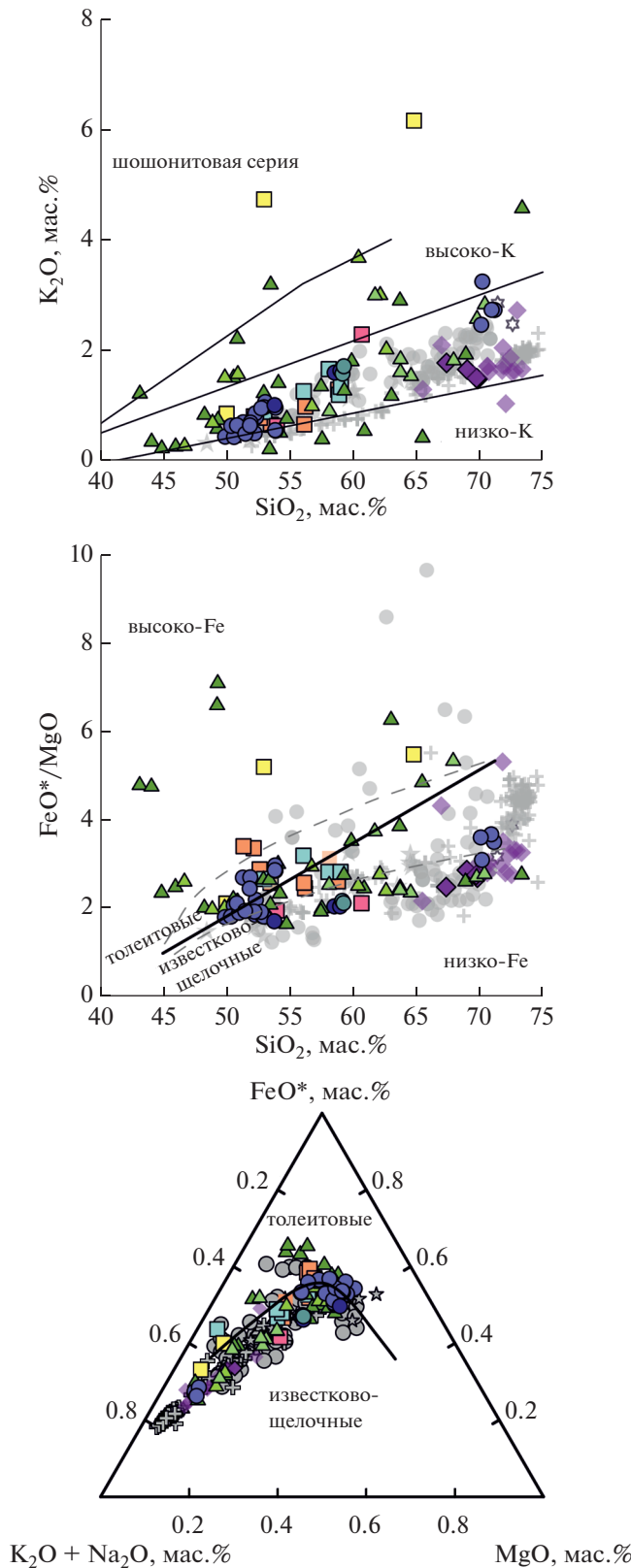


Рис. 2. Классификационные диаграммы для пород Паужетского района. Поля приведены согласно работам (Miyashiro 1974; Le Maitre et al., 2002).

и соответствующее N-MORB (Sun, McDonough, 1989) содержание остальных редкоземельных элементов, Zr, Hf, Y, Nb, Ta.

Юго-западная, западная и северо-западная части Паужетского вулканического района сложены вулканогенными породами (туфы, лавовые и пирокластические потоки, экструзивные купола, жильные образования) широкого диапазона составов – от базальтов до дацитов и риолитов. На диаграммах Харкера (рис. 3) видно линейное изменение содержаний петрогенных элементов – от основных до- и посткальдерных вулканитов к игнимбрикам закономерно возрастает содержание кремнезема и щелочей и понижается содержание совместимых элементов, отклоняются лишь составы отдельных гидротермально измененных пород. Сопоставление полученных данных и ранее опубликованных составов пород центральной и восточной частей района подтверждает отмеченное в работе (Ponomareva et al., 2004) существование двух различных трендов на диаграммах Харкера: относительно обогащенные TiO_2 , FeO, MgO, K_2O и обедненные Al_2O_3 породы влк. Дикий Гребень против пород кальдеры Курильского озера и влк. Ильинский (рис. 4). До- и посткальдерные основные вулканиты тяготеют к тренду пород влк. Дикий Гребень, тогда как голыгинские игнимбриты и туфы несколько смещаются в сторону тренда отложений пород Курильского озера. Определение состава внутрикальдерных отложений паужетской свиты и алнейской серии затруднено из-за многочисленных наложенных метасоматических изменений. Ниже кратко рассмотрим вариации состава пород отдельных эруптивных центров, от наиболее древних к современным.

Докальдерные вулканиты

Породы доголыгинских региональных эруптивных центров (см. рис. 1), сформировавшиеся 3–2 млн лет назад, относятся к умеренно-калиевым и умеренно-железистым андезитам и андезибазальтам, тогда как метасоматизированные породы алнейской серии в подошве голыгинских игнимбриков (420–440 тыс. лет), вскрытые внутрикальдерными скважинами, представлены туфами и туфобрекчиями основного состава и редкими потоками базальтовых лав (см. Supplementary, ESM_1.xlsx (Таблица А.2); Структура ..., 1993; рис. 2).

Для горы Орлиное Крыло характерно переслаивание потоков андезитового и андезибазальтового состава, для горы Ключевская – более кислые (порядка 59 мас. % SiO_2) породы (богатые мафическими включениями) в нижней части разреза и более примитивные (до 52 мас. % SiO_2) – в верхней (см. Supplementary, ESM_1 (Таблица А.2)). Примечательно, что, несмотря на более древний

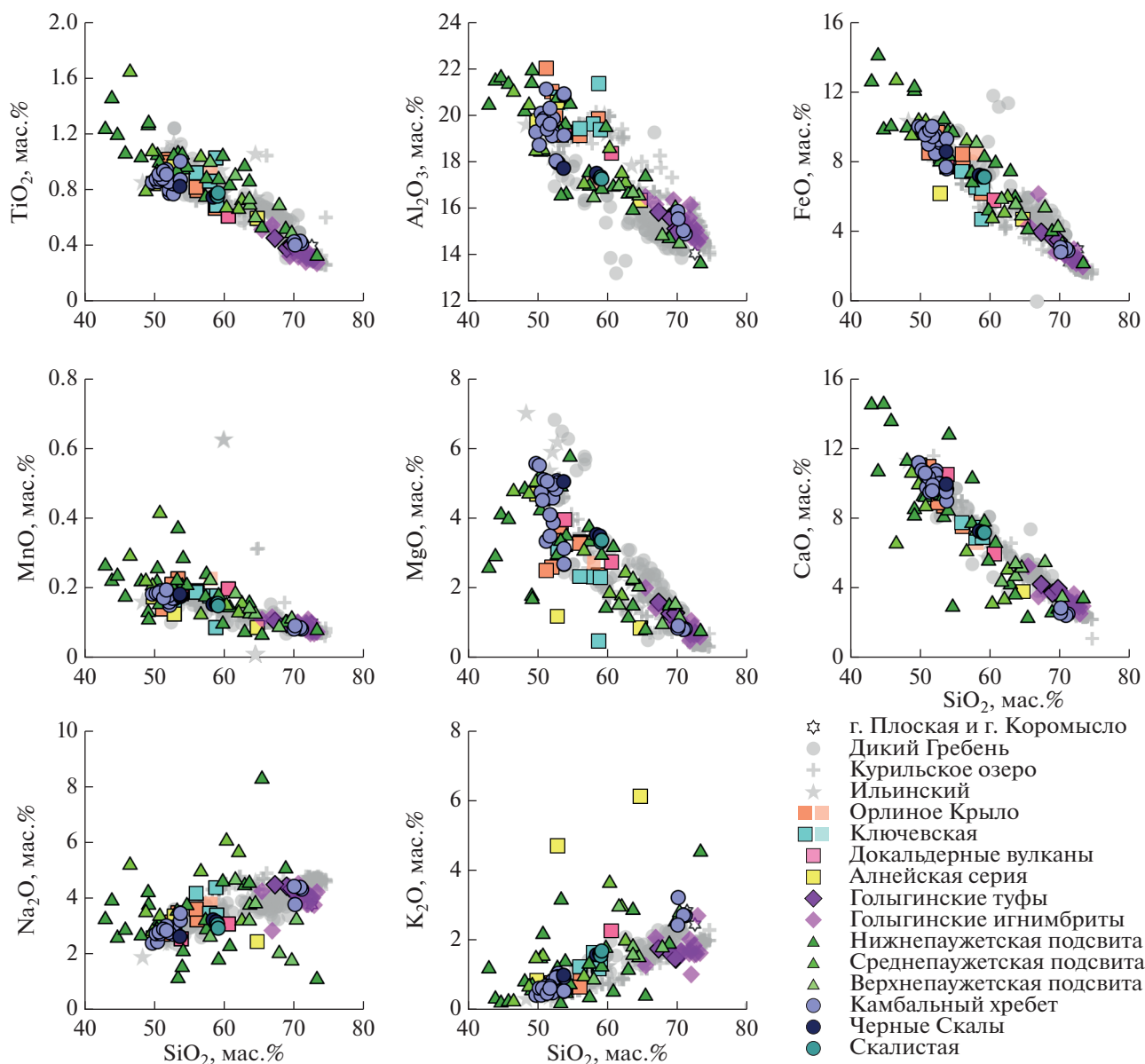


Рис. 3. Диаграммы Харкера для пород Паужетского района.

Оконтуренные черными значки – новые данные; неоконтуренные – согласно литературным источникам (составы пород извержения кальдеры Курильского озера, вулканов Ильинский, Плоская, Коромысло, Дикий Гребень, Ключевская и Орлиное Крыло – согласно работам: Bindeman, Bailey, 1994; Bindeman et al., 2004, 2010, 2019; Покровский и др., 1999; Толстых и др., 2003; Ропотаева et al., 2004). Здесь и далее на диаграммах содержания петрогенных элементов приведены в пересчете на 100% сухого вещества.

возраст, они формируют единые тренды с породами Паужетской структуры.

Гольгинские туфы и игнимбриты

В средней части гольгинского горизонта, вскрытого скв. К-6, породы содержат 69–70 мас. % SiO_2 , тогда как в верхней части разреза их состав смещается в несколько менее кремнекислую область (67.4 мас. % SiO_2). Внутрикальдерные туфы

гольгинского горизонта гидротермально изменены (метасоматизированы) – для рассматриваемых образцов изменения соответствуют фации цеолитовых пропилитов с наложенной аргиллизацией, согласно (Структура ..., 1993), однако степень их проработки существенно варьирует вдоль разреза – для изучения выбраны образцы из наименее измененных частей. Валовые составы данных образцов лежат в поле составов гольгинских игнимбритов, находящихся за пределами кальдеры

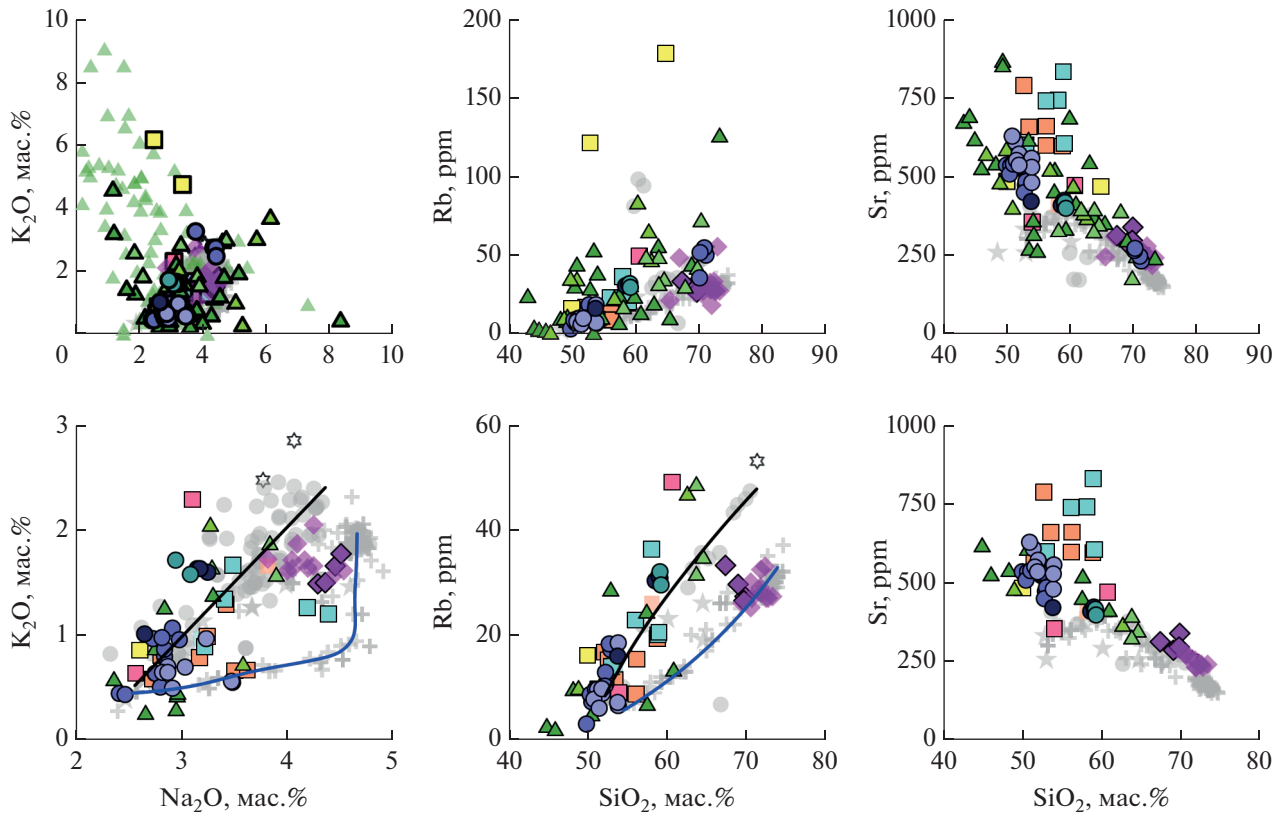


Рис. 4. Полученные данные (верхний ряд диаграмм) и данные, использованные для дальнейшей интерпретации (без анализов сильно метасоматизированных образцов). Условные обозначения см. на рис. 2. Черная линия обозначает тренд эволюции пород влк. Дикий Гребень, синяя кривая – отложений Курильского озера (вслед за Ponomareva et al., 2004).

и не подвергавшихся гидротермально-метасоматической проработке — как ранее опубликованных (Bindeman et al., 2010), так и приведенных в настоящей работе, которые также показывают изменение составов от более кремнекислых в нижней части разреза (70 мас. % SiO₂) к менее кремнекислым (60 мас. % SiO₂) в верхней.

Посткальдерная паужетская свита

Нижнепаужетская подсвита в районе скв. К-6 сложена переслаиванием туфов от андезибазальтового до андезидацитового состава (53.5–63 мас. % SiO₂) и лавовых потоков от базальтового до андезибазальтового состава.

Среднепаужетская подсвита в нижней–средней части разреза представлена переслаиванием туфопесчаников, туфов (порядка 50 мас. % SiO₂) и лавовых потоков базальтового-андезитового состава, в верхней — туфами андезидацитового состава (62–63 мас. % SiO₂).

Верхнепаужетская подсвита сложена туфами преимущественно дацитового и риолитового со-

става, реже андезитового (58–70.5 мас. % SiO₂), изредка перемежаемыми единичными лавовыми потоками андезидацитового состава.

Камбальный хребет, вулканы Черные Скалы, Скалистая

Наиболее ранние продукты извержений представлены отложениями туфов, преимущественно сложенных лапилли и бомбами базальтового и андезибазальтового состава (50–54 мас. % SiO₂). Туфы образуют слой мощностью до 25 м, обнажающийся в разных частях Камбального хребта по всей его протяженности. Выше туфы перекрываются лавовыми и пирокластическими потоками также базальтового и андезибазальтового состава, которые прорываются риолитовыми экструзиями (70–71 мас. % SiO₂) и многочисленными приповерхностными интрузиями основного состава. Жерловая фация вулканов Черные Скалы и Скалистая представлена брекчиевидными породами андезитового состава (58.5–59 мас. % SiO₂).

Изотопный состав Sr и Nd

Значения отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (рис. 5) в неизменных породах Паужетского района варьируют в диапазонах 0.7030–0.7043 и 0.51308–0.51318 (ϵ_{Nd} 8.48–10.7) соответственно. Полученные составы (Supplementary, ESM_1.xlsx (Таблица А.5)) перекрываются с диапазоном вариаций изотопного состава ряда вулканических центров Камчатки (рис. 6) – как современных (Северная группа вулканов), так и древних кальдер (например, Карымшина).

Закономерных вариаций состава Nd для пород большинства эруптивных центров не отмечается – составы преимущественно перекрываются в пределах погрешности измерения. Исключение составляют голыгинские игнимбриты, формирующие две группы точек: 0.51308–09 и 0.51315–17 (ϵ_{Nd} 8.5–8.7 и 9.9–10.4 соответственно), никак не коррелирующие с положением пород в разрезе.

Голыгинские игнимбриты, риодациты горы Коромысло и дациты влк. Ильинский обогащены радиогенным Sr относительно пород влк. Дикий Гребень, отложений кальдеры Курильского озера и до- и посткальдерных вулканитов основного состава.

Влияние гидротермальных изменений на валовый состав внутрикальдерных отложений

Внутрикальдерные отложения, вскрытые скважинами геотермального месторождения, в различной степени изменены. Для рассматриваемых разрезов характерна последовательная смена среднетемпературных пропилитов (хлорит-альбитовая ассоциация) более низкотемпературными (цеолитовые и трансильванские – кальцит-гидрослюдистые пропилиты), которые, в свою очередь, периодически осложняются еще более низкотемпературной аргиллизацией (Структура ..., 1993). Общая неоднородность отложений – в разрезе представлены переслаивания пирокластических пород, лавовых потоков и жильных тел (вариации состава, плотности, пористости, и, соответственно, проницаемости пород) и широкое разнообразие наложенных процессов (как тектонических, так и гидротермально-метасоматических), не позволяет провести четкую корреляцию между поведением отдельных элементов и типом метасоматоза. Неизменные аналоги пород паужетской свиты не выходят на поверхность и не вскрываются скважинами геотермального месторождения. Однако сопоставление составов неизменных вулканитов Паужетского района (влк. Камбальный, гора Ключевская, гора Орлиное Крыло) и метасоматизированных пород внутрикальдерных отложений позволяет отобрать для последующих наблюдений наименее измененные образцы пород, на состав которых метасоматические (гидротермальные) про-

цессы не оказали критического значения (рис. 4). Наиболее сильно метасоматические процессы отражаются на содержании Mg, Ca, Na, K, Sr, Nb, La, Y. Для сильно измененных пород в изученных разрезах характерны следующие систематически повторяющиеся отклонения: обеднение MgO и обогащение Na_2O лавовых потоков нижнепаужетской подсвиты вне зависимости от типа метасоматоза, в случае сочетания трансильванской пропилитизации и аргиллизации также могут повышаться содержания Sr, Nb, La, редко – K и Y, и понижаться – Ca. Для туфов нижнепаужетской и верхнепаужетской подсвиты обычно отмечается пониженное содержание Na_2O , вне зависимости от типа метасоматоза, для лавовых потоков и плотных туфов среднепаужетской, наоборот, повышенное. Также наблюдаются значительные, но не систематические отклонения в содержании других элементов для отдельных образцов, например, Al, Ti, Fe, Rb. С учетом данных особенностей для дальнейшей интерпретации нами были отобраны образцы, состав которых наименее изменился в ходе метасоматических процессов.

Породы голыгинского горизонта не показывают значительных отличий от поверхностных неизменных голыгинских игнимбритов (Bindeman et al., 2010).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вариации состава вулканогенных пород Паужетского района

Содержания петрогенных элементов и микроэлементов для большинства пород Паужетского района определяются фракционированием мантийных магм в надсубдукционных обстановках, однако для отдельных объектов характерна более сложная эволюция магматизма.

Отношения несовместимых элементов, такие как Ba/Nb, La/Nb, Rb/Ba, Nb/Zr, практически не меняются с понижением содержания MgO или возрастанием K_2O для внутрикальдерных отложений и пород вулканов Ключевская, Орлиное Крыло, Камбальный (рис. 7), что отвечает эволюции магм в ходе фракционной кристаллизации.

Голыгинские игнимбриты, лежащие за пределами кальдеры, показывают широкие вариации содержания несовместимых микроэлементов, часто не коррелирующие с изменением содержания макрокомпонентов (рис. 7а, 7в). Характерное для них антидромное изменение состава в ходе извержения, маркирующееся изменением состава в более основную область вверх по разрезу, вероятно, отвечает постепенному изменению состава очага, питающего извержение, плавно происходящему за счет подпитки основными магмами и постепенным извержением ранее эволюционировавшей магмы. Для пород кальдеры Курильского

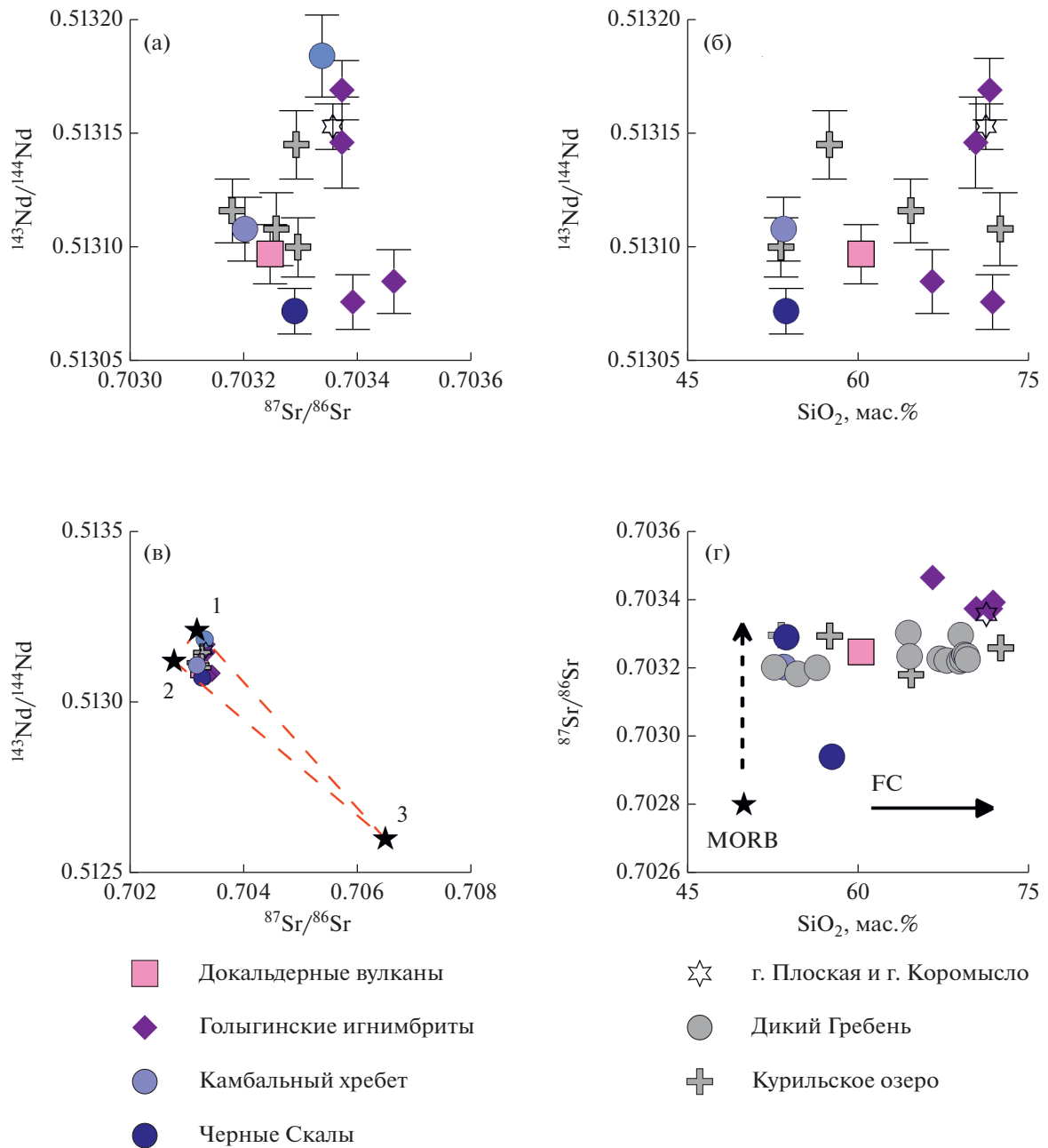


Рис. 5. (а) Изотопные отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в породах Паужетского района. Погрешность измерения изотопного состава Sr меньше используемых значков.
 (б) Вариации изотопного состава неодиима.
 (в) Изотопные отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. 1 – средний состав измененных базальтов камчатских офиолитов (Duggen et al., 2007); 2 – состав мантийного клина под Северной Камчаткой (Portnyagin et al., 2005); 3 – средний состав осадков в северо-западной части Тихого океана (Bailey, 1993; Bindeman et al., 2004).
 (г) Вариации отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ относительно SiO_2 в породах Паужетского района. Пунктирная линия отражает влияние богатых Sr флюидов, отделяющихся от погружающегося метасоматизированного слэба (Kerzhinskas et al., 1997; Dorendorf et al., 2000; Churikova et al., 2001; Portnyagin et al., 2007), сплошная – фракционную кристаллизацию. Изотопные отношения для гольгинских игнимбритов, пород гор Коромысло, Черные Скалы, посткальдерных вулканитов приведены согласно настоящей работе, для вулканов Ильинский, Дикий Гребень, Ключевская, Орлиное Крыло, кальдеры Курильского озера – согласно работам (Структура ..., 1993; Bindeman, Bailey, 1994; Bindeman et al., 2010, 2019; Rinkleff, 1999).

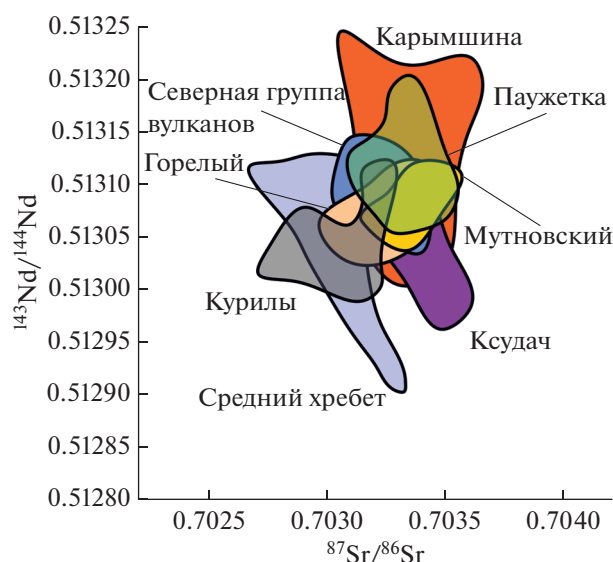


Рис. 6. Изотопные состав Sr и Nd в породах Камчатки и Курильских островов. Изотопный состав пород других районов приведен согласно (Bindeman, Bailey, 1999; Bindeman et al., 2004, 2010, 2019; Portnyagin et al., 2005, 2007, 2015; Seligman et al., 2014).

озера в среднем характерно увеличение значения отношения Ba/Nb с возрастанием содержания MgO и более резкое увеличение La/Nb для кислых пород, что предполагает более сложную эволюцию магматизма, не ограничивающуюся фракционной кристаллизацией, для всех пород извержения кальдеры Курильского озера, и увеличение вклада иных процессов по мере смещения составов магм в более кислую область. Породы влк. Дикий Гребень, для которых ранее показана важная роль смешения магм (Bindeman, Bailey, 1994), характеризуются плавным увеличением значения Ba/Nb отношения с возрастанием содержания MgO.

Данные закономерности свидетельствует о доминирующей роли фракционной кристаллизации в эволюции основных и средних магм, формировавших юго-западную, западную и северо-западную части Паужетского района. Формирование голыгинских игнимбритов, отложений кальдеры Курильского озера, вулканов Ильинский и Дикий Гребень отвечает более сложному сочетанию процессов, включая ассимиляцию ранее извергнутого материала вещества и пополнение более основными магмами, что согласуется с ранее полученными изотопными данными (Bindeman et al., 2004): вариации $\delta^{18}\text{O}$ в продуктах кальдерообразующих извержений свидетельствуют о периодической подпитке питающих их кислых верхнекоровых очагов базальтовыми магмами. На влк. Дикий Гребень хорошо представлены процессы смешения базальтовых и кислых магм (Bindeman, Bailey, 1994);

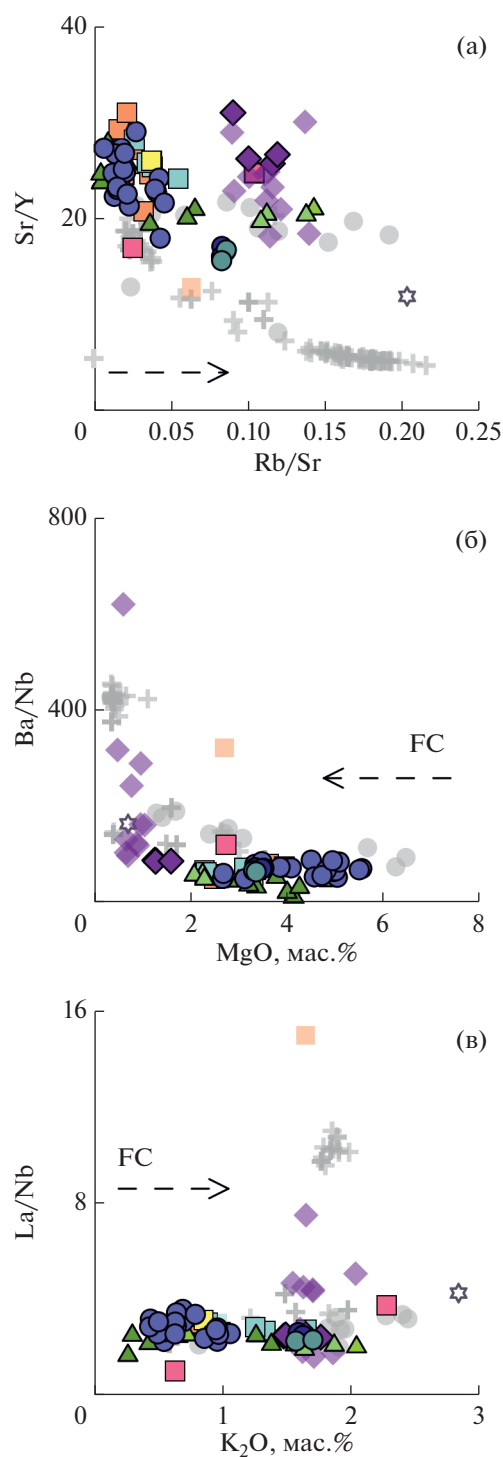


Рис. 7. Вариации отношений микроэлементов в породах Паужетского района. Условные обозначения см. на рис. 2. Пунктирными стрелками обозначены тренды изменения состава при фракционной кристаллизации (FC).

происхождение базальтов и продуктов их дифференциации отвечает нижне-среднекоровому фракционированию в поле стабильности амфибола.

Вариации содержаний микроэлементов и изотопия Sr и Nd свидетельствуют о едином мантийном источнике магм Паужетского района, эволюционирующем во времени, а также о роли контаминации корового материала в ходе эволюции кислых магм, участвовавших в кальдерообразующих извержениях (например, Ba/Nb–MgO (рис. 7б) и Th/Tb–Th/Ta отношения). Отличия в составах пород отвечают фракционированию базальтовых магм в различных условиях, различной степени контаминации ранее извергнутого материала, а также смешению магм в магматических системах отдельных эруптивных центров.

MELTS-моделирование

Для проверки возможности получения всего диапазона составов пород Паужетского района в ходе эволюции магм, выплавляющихся из единого источника с последующей дифференциацией, было проведено моделирование с помощью программы MELTS (Gualda et al., 2012). В качестве стартового состава рассматривались базальты влк. Ильинский из работы (Ponomareva et al., 2004) и базальты влк. Камбальный – наиболее основные из рассматриваемых пород, не подвергавшихся гидротермальной проработке. Вариации условий (9–1 кбар), режимов (фракционирование при постоянном давлении, декомпрессионная кристаллизация, смена режимов) и содержания воды (0.5–5 мас. %) позволили получить составы голыгинских игнимбритов из исходных базальтов. Наилучшее соответствие (рис. 8) обеспечивает фракционирование стартового базальта влк. Камбальный с содержанием воды 2 мас. % при 6 кбар и кислородном буфере NNO.

Фракционная кристаллизация при более низкой исходной концентрации воды (рис. 9) приводит к обогащению составов в диапазоне 50–60 мас. % SiO₂, титаном и железом, чему не наблюдается природных аналогов, а также приводит к систематическому истощению расплава Al₂O₃. При более высокой – к занижению содержаний K₂O и TiO₂.

Кристаллизация при более высоких давлениях (7–9 кбар) также хорошо описывает формирование составов голыгинских игнимбритов, за исключением некоторого обеднения MgO. При более низких – кислая часть тренда обедняется титаном и алюминием и обогащается натрием и кальцием, чему также не наблюдается природных аналогов.

Декомпрессионная кристаллизация в диапазоне 8–6 кбар наиболее удачно описывает тренд эволюции основных и средних пород влк. Камбальный и позволяет получить составы голыгинских игнимбритов, но хуже описывает эволюцию докальдерных вулканов Ключевская и Орлиное Крыло.

MELTS-моделирование подтверждает геохимические наблюдения и позволяет считать фракционную кристаллизацию близких по составу родительских магм в ниже-среднекоровых резервуарах основным механизмом эволюции магм, формировавших юго-западную, западную и северо-западную части Паужетского района. Все отклонения отвечают незначительным вариациям глубины резервуара и состава примитивных магм.

Разброс составов голыгинских игнимбритов и туфов, а также туфов паужетской свиты, вероятно, обусловлен захватом коровых пород, близких по составу, и в незначительной степени автосмещению в процессе дифференциации, отдельные следы которого наблюдаются в отобранных образцах.

Наблюдается систематическое отличие трендов пород влк. Дикий Гребень с четко выраженными линейными трендами смешения магм, выявленными ранее (Bindeman, Bailey, 1994).

Мантийный источник родительских магм

Бликие значения изотопного состава Sr и Nd пород различных эруптивных центров, а также отсутствие корреляции вариаций изотопного состава и содержания макрокомпонентов и других маркеров кристаллизации, свидетельствует о сходстве родительских магм и возможном едином источнике, незначительно эволюционирующем во времени.

Фигуративные точки составов пород Паужетского района в координатах соотношений изотопного состава Sr и Nd ложатся в левую часть треугольника: средний состав измененных базальтов камчатских офиолитов–состав мантийного клина–средний состав осадков в северо-западной части Тихого океана, что в целом характерно для голоценовых камчатских вулканитов (например, Portnyagin et al., 2015) и позволяет предполагать мантийное происхождение родительских магм. Бликие к MORB значения отношения ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd при систематическом сдвиге величины ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в более радиогенную область интерпретируется нами как результат влияния богатого стронцием и бедного неодимом флюида, отделяющегося от измененной океанической коры погружающегося слэба (Кеpezzhinskas et al., 1997; Dorendorf et al., 2000; Churikova et al., 2001; Portnyagin et al., 2007), на мантийный источник.

Отсутствие значительного изменения изотопных соотношений в ходе эволюции состава магм (рис. 5) согласуется с геохимическими наблюдениями и подтверждает доминирующую роль фракционной кристаллизации в процессе формирования всего разнообразия рассматриваемых пород. Вариации изотопного состава Sr и Nd кальдерообразующих извержений отвечают увеличению влияния магм мантийного происхождения на состав

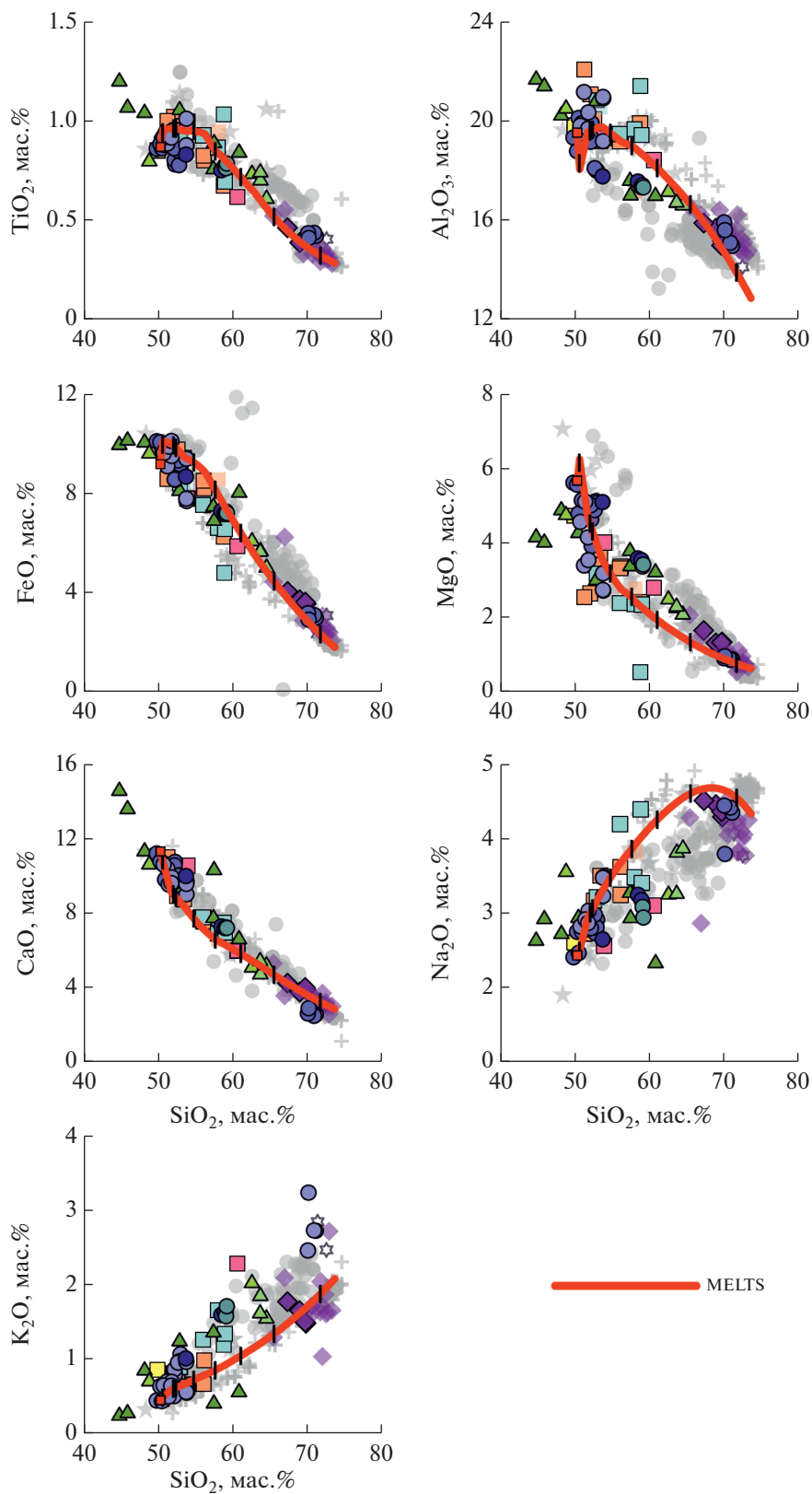


Рис. 8. Результаты MELTS-моделирования эволюции магм при 6 кбар, кислородном буфере NNO, стартовой температуре $\sim 1250^\circ\text{C}$ и 2 мас. % H_2O .

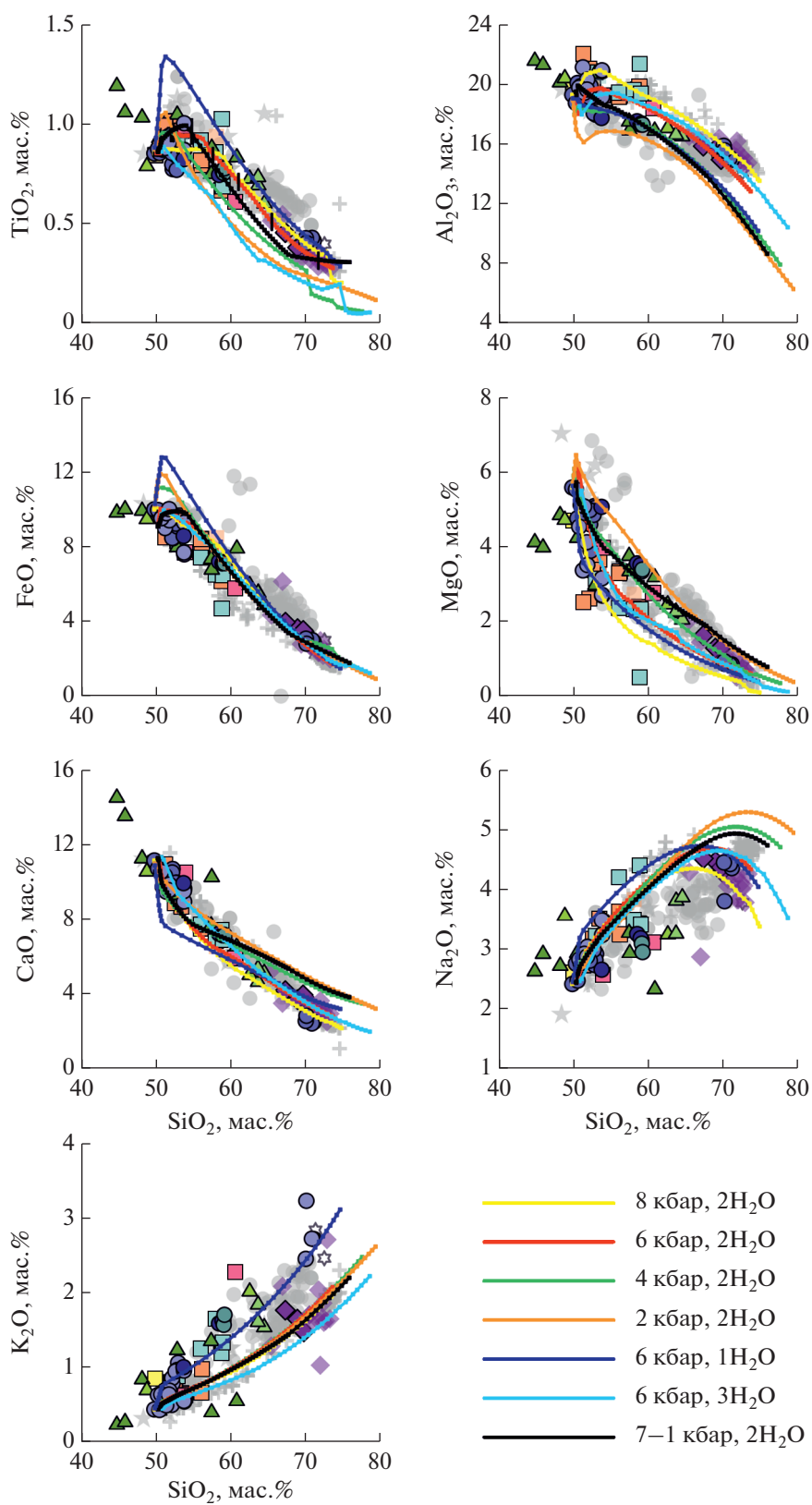


Рис. 9. Результаты MELTS-моделирования эволюции магм Паужетского района при различных условиях.

системы в ходе подъема значительных масс наиболее эволюционировавших магм, а также захвату и частичной ассимиляции ранее сформировавшихся и зачастую гидротермально измененных пород, что согласуется с обеднением $\delta^{18}\text{O}$ в голоценовых игнимбритах Курильского озера относительно более древних голягинских игнимбритов (Bindeman et al., 2010).

Корреляция полученных результатов с опубликованными данными и общими геологическими характеристиками района

Полученные в ходе моделирования параметры косвенно подтверждаются геофизическими исследованиями. Исследования многих геотермальных полей показывают связь геотермальных систем с долгоживущими магматическими системами — как источниками тепла и флюида (например, (Lowenstern et al., 2015) для геотермального поля в кальдере Йеллоустоун, США, или (Lucci et al., 2020) для кальдеры Лос Хумерос, Мексика). Паужетская кальдера не является исключением, несмотря на то, что она находится на регрессивном этапе развития гидротермально-магматических систем и в данное время исследователи не фиксируют прямой связи состава ее современных продуктов (паро-газовых струй, гидротермальных глин) с глубинным питанием (например, Рычагов и др., 2012). В качестве вероятного источника тепла рассматривается мощный горизонт (4–5 км) повышенной проходимости флюида на глубине до 9 км (Феофилактов и др., 2021). В ходе изучения извержения 2017 г. влк. Камбальный методом сейсмической томографии была уточнена глубина аномалии. Были получены данные о строении магматической системы, питающей извержение, и зафиксирована изолированная от современных магматических резервуаров аномалия под северной частью Камбального хребта (прослеживается на глубину до ~15 км), протягивающаяся далее в сторону пос. Паужетка и отвечающая за функционирование гидротермальной системы (Komzeleva et al., 2021).

Геохимические данные подтверждают существование единой долгоживущей магматической системы, активно описываемой в более ранних работах (например, Структура ..., 1993; Долгоживущий ..., 1980). Данная система отвечала за вулканическую активность района на протяжении как минимум 3 млн лет и, исходя из полученных нами результатов, содержала крупный магматический резервуар (или сеть резервуаров) на глубине порядка 6 кбар (12–15 км), периодически подпитываемый мантийными магмами. Значительного изменения региональной позиции, угла погружения субдуцирующей плиты и, соответственно, геохимии продуцируемых базальтовых магм за 3 млн лет не фиксируется.

Мы предполагаем, что данный магматический резервуар (сеть резервуаров), постепенно остывающий в отсутствие активной подпитки мантийными магмами, остается крупным источником тепла и, возможно, флюидов, отвечающим за активность геотермальной системы, что косвенно подтверждается совпадением независимо полученных глубин залегания резервуара (12–15 км по данным моделирования) и геофизической аномалии (до 15 км, Komzeleva et al., 2021).

Исходя из петрологических наблюдений (предварительные результаты приведены в, например, Щеклеина и др., 2021), кальдерообразующие извержения предварялись подъемом фракционировавшей кислой магмы в относительно малоглубинную область — 1–2 кбар для магм голягинских игнимбритов (Щеклеина и др., 2021) и 2–3 кбар для магм Курильского озера (Rinkleff, 1999). Формирование крупных кислых очагов (или сети очагов) и дальнейшее извержения неизбежно приводило к ассимиляции ранее сформированного корового материала. Единый мантийный источник и схожие пути эволюции всех магм района на протяжении нескольких миллионов лет привели к тому, что контаминация ранее изверженного материала относительно слабо отражается на большинстве геохимических характеристик игнимбритов, приводя к формированию довольно однородных областей на большинстве графиков (рис. 2–5), однако четко маркируется изменением изотопного состава кислорода — отложения извержения Курильского озера отличаются пониженным значением $\delta^{18}\text{O}$ (Bindeman et al., 2010), фиксирующем ассимиляцию гидротермально переработанных пород.

Постепенная кристаллизация гигантских объемов кислых магм, отвечающих за син- и посткальдерный кислый вулканизм, привела к созданию своеобразного плотностного фильтра, который привел к смещению путей миграции мантийных магм и возникновению современной независимой магматической системы влк. Камбальный за пределами Паужетской кальдеры.

ВЫВОДЫ

Продукты последних ~500 тыс. лет эруптивной активности вулканов Паужетского района представлены умеренно-калиевыми породами с типичными геохимическими метками островодужных обстановок, варьирующими по составу от базальтов до риолитов.

Формирование всего разнообразия пород возможно при эволюции близких по составу примитивных магм, формирующихся при частичном плавлении метасоматизированного мантийного источника. Фракционирование наиболее основных обнаруженных составов с 2 мас. % H_2O при

давлении ~6 кбар хорошо описывает эволюцию пород рассматриваемых эруптивных центров и косвенно подтверждается современными геофизическими наблюдениями, и, при примерно 50–60% фракционирования, позволяет получить составы игнимбритов кальдерообразующих извержений.

Петрологические данные предполагают дальнейший подъем эволюционировавших магм в малоглубинную область (1–2 кбар), где формировался очаг (или сеть очагов), питающий кальдерообразующее извержение. Антидромная последовательность, зафиксированная в разрезах голыгинских игнимбритов и туфов, отвечает изменению состава малоглубинного очага в ходе извержения – за счет активной подпитки из глубинного резервуара (~6 кбар), в свою очередь, питаемого магмами мантийного происхождения.

Вариации отношений несовместимых элементов и изотопного состава неодима в голыгинских игнимбритах отвечают постепенному увеличению влияния магм мантийного происхождения на состав системы по мере удаления из нее наиболее эволюционировавших магм и захвату ранее изверженного материала при подъеме магмы к поверхности.

Формирование пород вулканов Дикий Гребень, Ильинский и отложений кальдеры Курильского озера дополнительно включают процессы смешения магм (влк. Дикий Гребень) и ассимиляцию корового вещества. Ассимиляция корового вещества, в том числе ранее извергнутых и гидротермально переработанных пород, также объясняет постепенное обеднение ¹⁸O от более древних голыгинских игнимбритов к более молодым отложениям кальдеры Курильского озера и дацитам влк. Ильинский.

Благодарности. Авторы выражают благодарность А. Нуждаеву, Р. Кузнецову, И. Большакову, А. Ермолинскому и В.Л. Сыворткину за помощь в проведении полевых работ, Ю.В. Фроловой за предоставленные образцы алнейской серии, Н. Некрылову и В. Щербакову за ценные комментарии, а также Питеру Толлану за измерения Sr-Nd изотопов в Даремском Университете. Работа посвящается памяти Т.И. Фроловой, воспитавшей несколько поколений магматических петрологов кафедры петрологии МГУ, в том числе и авторов настоящей работы.

Источники финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (грант № 19-17-00241). Полевые работы 2012 г. поддержаны National Geographic Society/Waitt Grants Program.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Амосова А.А., Пантеева С.В., Татаринов В.В. и др. Рентгенофлуоресцентное определение основных породообразующих элементов из образцов массой 50 и 110 мг // Аналитика и контроль. 2015. Т. 19. № 2. С. 130–138.
- Аверьев В.В., Белоусов В.И. Геологический очерк района. М.: Наука, 1965. С. 8–22.
- Аверьев В.В., Святловский А.Е. Вулкано-тектонические структуры Южной Камчатки // Изв. АН СССР. Серия геологическая. 1961. № 6. С. 98–100.
- Апрелков С.Е. Игнимбриты Голыгинских гор (Южная Камчатка) // Тр. Лаборатории вулканологии. 1961. № 20. С. 92–96.
- Белоусов В.И. Геология геотермальных полей. М.: Наука, 1978. 176 с.
- Влодавец В.И., Пуйн Б.И., Горшков Г.С. Каталог действующих вулканов СССР // Бюллетень вулканологических станций. 1957. № 25. 180 с.
- Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки // Под ред. Ю.П. Масуренкова. М.: Наука, 1980. 172 с.
- Кожжемяка Н.Н., Литасов Н.Е. Четвертичные пемзовые, туфоигнимбритовые поля и центры извержений // Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки. М.: Наука, 1980. С. 116–128.
- Леонов В.Л. Структурные условия локализации высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1989. 104 с.
- Леонов В.Л., Розозин А.Н. Карымшина – гигантская кальдера-супервулкан на Камчатке: границы, строение, объем пирокластики // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 14–28.
- Литасов Н.Е., Важеевская А.А. Вулкан Камбальный: научное издание // Действующие вулканы Камчатки, в 2-х томах. М.: Наука, 1991. Т. 2. С. 396–405.
- Мелекесцев И.В. Основные этапы формирования современного рельефа Курило-Камчатской области // Камчатка, Курильские и Командорские острова. М.: Наука, 1974. С. 337–345.
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Эрлих Э.Н., Кожжемяка Н.Н. Вулканические горы и равнины // Камчатка, Курильские и Командорские острова. История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. Отв. ред. И.В. Лучицкий. М.: Наука, 1974. С. 162–233.
- Покровский Б.Г., Вольнец О.Н. Геохимия изотопов кислорода в эффузивах Курило-Камчатской дуги // Петрология. 1999. Т. 7. № 3. С. 227–251.
- Пополитов Э.И., Вольнец О.Н. Геохимические особенности четвертичного вулканизма Курило-Камчатской островной дуги и некоторые вопросы петрогенезиса. Новосибирск: Наука, 1981. 184 с.
- Рычагов С.Н., Давлетбаев Р.Г., Ковина О.В. Гидротермальные глины и пирит геотермальных полей: значение в геохимии современных эндогенных процессов (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2009. № 2. С. 39–55.
- Рычагов С.Н., Сандимирова Е.И., Сергеева А.В., Нуждаев И.А. Состав пепла вулкана Камбальный (извержение 2017 г.) // Вест. КРАУНЦ. Серия Науки о Земле. 2017а. № 4. С. 13–27.
- Рычагов С.Н., Сергеева А.В., Чернов М.С. Минеральные ассоциации основания толщи глин как индикаторы

- флюидного режима Паужетской гидротермальной системы (Камчатка) // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36. № 6. С. 94–110.
- Рычагов С.Н., Соколов В.Н., Чернов М.С.* Гидротермальные глины геотермальных полей Южной Камчатки: новый подход и результаты исследований // Геохимия. 2012. № 4. С. 378–378.
- Структура гидротермальной системы // Отв. ред. В.И. Белоусов, И.С. Ломоносов. М.: Наука, 1993. 298 с.
- Толстых М.Л., Наумов В.Б., Бабанский А.Д. и др.* Химический состав, летучие компоненты и элементы-примеси расплавов, формировавших андезиты вулканов Курило-Камчатского региона // Петрология. 2003. Т. 11. № 5. С. 451–470.
- Феофилактов С.О., Рычагов С.Н., Логинов В.А. и др.* Глубинное строение района Паужетской гидротермальной системы (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2021. № 1. С. 40–56.
- Щеклеина М.Д., Плечов П.Ю., Биндеман И.Н. и др.* Реконструкция условий извержения Гольгинских игнимбригов (Южная Камчатка) // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии. 2021. С. 169–170.
- Bailey J.C.* Geochemical history of sediments in the north-western Pacific Ocean // *Geochem. J.* 1993. V. 27. № 2. P. 71–90.
- Bergal-Kuvikas O., Leonov V., Rogozin A. et al.* Stratigraphy, structure and geology of Late Miocene Verkhnevachinskaya caldera with basaltic-andesitic ignimbrites at Eastern Kamchatka // *J. Geosci.* 2019. № 64. P. 229–250.
- Bindeman I.N., Bailey J.C.* A model of reverse differentiation at Dikii Greben Volcano, Kamchatka: Progressive basic magma vesiculation in a silicic magma chamber // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1994. V. 117. № 3. P. 263–278.
- Bindeman I.N., Bailey J.C.* Trace elements in anorthite megacrysts from the Kurile Island Arc: A window to across-arc geochemical variations in magma compositions // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1999. V. 169. № 3–4. P. 209–226.
- Bindeman I.N., Ponomareva V.V., Bailey J.C., Valley J.W.* Volcanic arc of Kamchatka: A province with high- $\delta^{18}\text{O}$ magma sources and large-scale $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ depletion of the upper crust // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2004. V. 68. № 4. P. 841–865.
- Bindeman I.N., Leonov V.L., Izbekov P.E. et al.* Large-volume silicic volcanism in Kamchatka: Ar-Ar and U-Pb ages, isotopic, and geochemical characteristics of major pre-Holocene caldera-forming eruptions // *J. Volcanology and Geothermal Res.* 2010. V. 189. № 1–2. P. 57–80.
- Bindeman I.N., Leonov V.L., Colón D.P. et al.* Isotopic and petrologic investigation, and a thermomechanical model of genesis of large-volume rhyolites in arc environments: Karymshina Volcanic Complex, Kamchatka, Russia // *Frontiers Earth Sci.* 2019. V. 6. P. 238.
- Churikova T., Dorendorf F., Wörner G.* Sources and fluids in the mantle wedge below Kamchatka, evidence from across-arc geochemical variation // *J. Petrol.* 2001. V. 42. № 8. P. 1567–1593.
- Cole J.W., Milner D.M., Spinks K.D.* Calderas and caldera structures: A review // *Earth-Sci. Rev.* 2005. V. 69. № 1–2. P. 1–26.
- Davidson J.P., Font L., Charlier B.L., Tepley F.J.* Mineral-scale Sr isotope variation in plutonic rocks – a tool for unravelling the evolution of magma systems // *Earth Environ. Sci. Transactions of the Royal Soc. Edinburgh.* 2008. V. 97. № 4. P. 357–367.
- DeMets C.* Oblique convergence and deformation along the Kuril and Japan trenches // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 1992. V. 97. № 12. P. 17615–17625.
- Dorendorf F., Wiechert U., Wörner G.* Hydrated sub-arc mantle: A source for the Kluchevskoy volcano, Kamchatka/Russia // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2000. V. 175. № 1. P. 69–86.
- Duggen S., Portnyagin M., Baker J. et al.* Drastic shift in lava geochemistry in the volcanic-front to rear-arc region of the Southern Kamchatkan subduction zone: Evidence for the transition from slab surface dehydration to sediment melting // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2007. V. 71. № 2. P. 452–480.
- Frolova T.I., Bindeman I.N., Mahmoud M., Bailey J.C.* Melanocratic inclusions in andesites and dacites of the Kurile-Kamchatka volcanic arc // *Int. Geol. Rev.* 1992. V. 34. № 2. P. 119–130.
- Gualda G.A.R., Lemons R.V., Carley T.L.* Rhyolite-MELTS: A modified calibration of MELTS optimized for silica-rich, fluid-bearing magmatic systems // *J. Petrol.* 2012. V. 53. № 5. P. 875–890.
- Hughes G.R., Mahood G.A.* Tectonic controls on the nature of large silicic calderas in volcanic arcs // *Geology.* 2008. V. 36. № 8. P. 627–630.
- Huttrer G.W.* Geothermal power generation in the world 2015–2020 update report // *World Geothermal Congress; Int. Geothermal Association: Reykjavik, Iceland.* 2020. P. 1–17.
- Kepezhinskas P., McDermott F., Defant M.J. et al.* Trace element and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on a three-component model of Kamchatka Arc petrogenesis // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1997. V. 61. № 3. P. 577–600.
- Komzeleva V., Koulakov I., Rychagov S.N. et al.* Sources of the eruption of Kambalny volcano (Southern Kamchatka) in March 2017 inferred from local earthquake tomography // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2021. V. 420. 107392.
- Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B. et al.* *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms, Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission of the Systematics of Igneous Rocks.* Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 236 p.
- Lundgren P., Lu Z.* Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. № 6. L06301.
- Lowenstern J.B., Bergfeld D., Evans W.C., Hunt A.G.* Origins of geothermal gases at Yellowstone // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2015. V. 302. P. 87–101.
- Lucci F., Carrasco-Núñez G., Rossetti F. et al.* Anatomy of the magmatic plumbing system of Los Hornos Caldera (Mexico): Implications for geothermal systems // *Solid Earth.* 2020. V. 11. № 1. P. 125–159.
- Martin E., Bindeman I.* Mass-independent isotopic signatures of volcanic sulfate from three supereruption ash deposits in Lake Tecopa, California // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2009. V. 282. № 1–4. P. 102–114.
- Miller C.F., Wark D.A.* Supervolcanoes and their explosive supereruptions // *Elements.* 2008. V. 4. № 1. P. 11–15.
- Miyashiro A.* Volcanic rock series in island arcs and active continental margins // *Amer. J. Sci.* 1974. V. 274. № 4. P. 321–355.

- Pearce J.A., Peate D.W. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas // *Annual Rev. Earth Planet. Sci.* 1995. V. 23. P. 251–286.
- Perepelov A.B., Puzankov M.Yu., Ivanov A.V. et al. Neogene dasanites in Western Kamchatka: Mineralogy, geochemistry, and geodynamic setting // *Petrology*. 2007. V. 15. № 5. P. 488–508.
- Ponomareva V.V., Kyle P.R., Melekestsev I.V. et al. The 7600 (¹⁴C) year BP Kurile Lake caldera-forming eruption, Kamchatka, Russia: Stratigraphy and field relationships // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2004. V. 136. № 3–4. P. 199–222.
- Ponomareva V.V., Churikova T., Melekestsev I.V. et al. Late pleistocene-holocene volcanism on the Kamchatka peninsula, northwest pacific region // *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region*. 2007. V. 172. P. 165–198.
- Ponomareva V.V., Bubenshchikova N., Portnyagin M. et al. Large-magnitude Pauzhetka caldera-forming eruption in Kamchatka: Astrochronologic age, composition and tephra dispersal // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2018. V. 366. P. 1–12.
- Portnyagin M., Hoernle K., Avdeiko G. et al. Transition from arc to oceanic magmatism at the Kamchatka-Aleutian junction // *Geology*. 2005. V. 33. № 1. P. 25–28.
- Portnyagin M., Bindeman I., Hoernle K., Hauff F. Geochemistry of primitive lavas of the Central Kamchatka Depression: Magma generation at the edge of the Pacific Plate // Eds. J. Eichelberger, E. Gordeev, M. Kasahara et al. *Volcanism and subduction: The Kamchatka region*. Washington D.C.: American Geophysical Union, 2007. P. 199–239.
- 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 // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2015. V. 307. P. 182–199.
- Rinkleff P.G. Petrologic evolution and stratigraphy of the eruptive products from the 7.7 ka (¹⁴C) Kurile Lake caldera eruption, southern Kamchatka, Russia. Doctoral dissertation: New Mexico Institute of Mining and Technology, Department of Geology. 1999. 198 p.
- Seligman A., Bindeman I., Jicha B. et al. Multi-cyclic and isotopically diverse silicic magma generation in an arc volcano: Gorely eruptive center, Kamchatka, Russia // *J. Petrol.* 2014. V. 55. № 8. P. 1561–1594.
- Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes // *Geol. Soc. London, Special Publ.* 1989. V. 42. № 1. P. 313–345.
- Troch J., Ellis B.S., Mark D.F. et al. Rhyolite generation prior to a Yellowstone supereruption: Insights from the Island Park–Mount Jackson rhyolite series // *J. Petrol.* 2017. V. 58. № 1. P. 29–52.
- Volynets O.N. Geochemical types, petrology, and genesis of Late Cenozoic volcanic rocks from the Kurile-Kamchatka island-arc system // *Inte. Geol. Rev.* 1994. V. 36. № 4. P. 373–405.

Pauzhetka Caldera (South Kamchatka): Exploring Temporal Evolution and Origin of Voluminous Silicic Magmatism

V. O. Davydova^{1,2}, I. N. Bindeman^{2,3}, M. D. Shchekleina^{1,2}, and S. N. Rychagov⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Fersman Mineralogical Museum RAS, Moscow, Russia

³ University of Oregon, Eugene, OR, USA

⁴ Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Peropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Pauzhetka Caldera was formed during the Golygin Ignimbrite eruption, the most extensive in Kamchatka over the last 1 Myr. Pauzhetka contains some much older (3 Ma) pre-caldera mafic eruptive centers, but no pre-caldera silicic activity has been discovered. After the caldera-forming eruption, a variety of products were produced in this area, from basalt to rhyolite. For understanding of the origin of voluminous silicic magmatism in thin mafic South Kamchatka crust, we used geochemical and isotope data. Our research has characterized the major and trace element composition of Golygin ignimbrite, intra-caldera altered deposits, pre-caldera (Mt. Orlineo Krylo, Mt. Klyuchevskaya) and post-caldera (Kambalny ridge, Chernie Skaly) eruptive centers. The isotope composition of Sr-Nd in Golygin ignimbrite and some eruptive products from post-caldera eruptions was investigated. The isotope variations indicate that the same mantle source was responsible for producing parental magmas during melting under fluid flux from the subducted slab. A dominant role of fractional crystallization under low crust conditions is suggested by geochemical data. MELTS-modelling correlate with geochemical data. The best model predicts fractional crystallization of Kambalny basalt with 2 wt % H₂O under 6 kbar to production the composition of Golygin dacite.

Keywords: Pauzhetka caldera, caldera-forming eruptions, ignimbrites, Sr isotopes, Nd isotopes, MELTS modeling