

НЕОПЛЕЙСТОЦЕН-ГОЛОЦЕНОВЫЙ ЭКСПЛОЗИВНЫЙ КАЛЬДЕРНЫЙ ВУЛКАНИЗМ БОЛЬШОЙ КУРИЛЬСКОЙ ГРЯДЫ

С.З. Смирнов^{1,✉}, А.А. Котов², О.В. Бергаль-Кувикас^{3,4}, А.В. Дегтерев⁵

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

²Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, Sendai, Japan

³Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский, бул. Пийта, 9, Россия

⁴Камчатский государственный университет им. В. Беринга, 683032, Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4, Россия

⁵Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, Россия

Поступила в редакцию: 01.10.2024

Принята в печать: 14.01.2025

Опубликована онлайн: 20.01.2025

DOI: [10.15372/GiG2025102](https://doi.org/10.15372/GiG2025102)

EDN: [ILBRFQ](https://ilbrfq.ru)

Ссылка для цитирования:

Смирнов С.З., Котов А.А., Бергаль-Кувикас О.В., Дегтерев А.В. (2025). Неоплейстоцен-голоценовый эксплозивный кальдерный вулканизм Большой Курильской гряды // Геология и геофизика, DOI: [10.15372/GiG2025102](https://doi.org/10.15372/GiG2025102), EDN: [ILBRFQ](https://ilbrfq.ru).

© С.З. Смирнов, А.А. Котов,
О.В. Бергаль-Кувикас, А.В. Дегтерев,
2025

✉ E-mail: ssmr@igm.nsc.ru

Эксплозивный кальдерный вулканизм относится к наиболее опасным природным явлениям, имеющим катастрофические последствия для живой природы, человека и его экономической деятельности. В статье проведен обзор и обобщение накопленных на сегодняшний день сведений о поздненеоплейстоцен-голоценовом вулканизме Большой Курильской гряды Курильских островов. Имеющаяся информация позволяет утверждать, что в неоплейстоцене и голоцене кальдерообразование было характерно для всей Большой Курильской гряды, но наиболее интенсивно оно проявилось на островах Южного и Центрального секторов, где Большая Курильская гряда сопрягается с задуговым бассейном Курильской глубоководной котловины. Подавляющее большинство рассматриваемых в данной работе эксплозивных четвертичных кальдер Большой Курильской гряды возникло в позднем неоплейстоцене 50–12 тыс. л. н. и раннем голоцене 8–6 тыс. л. н. Активное кальдерообразование Большой Курильской гряды могло быть синхронно массовому образованию кальдер Восточно-Камчатского вулканического пояса и Южной Камчатки. Кальдерообразование Большой Курильской гряды в неоплейстоцене и голоцене было связано с развитием в верхних горизонтах земной коры (3–12 км) крупных очагов кислых магм, преимущественно дацитового состава за счет частичного плавления метабазитовых верхнекоровых субстратов при температурах 830–890 °С. Риолитовые расплавы этих магм были насыщены H_2O , CO_2 , соединениями серы и, вероятно, другими газовыми компонентами, что привело к их дегазации на предэруптивных стадиях развития очагов. В работе поставлены вопросы, решение которых могло бы способствовать более эффективному прогнозу крупных кальдерообразующих извержений вулканов Большой Курильской гряды и мониторингу активных центров кальдерного вулканизма.

Кальдера, вулкан, эксплозивный вулканизм, магматизм, Большая Курильская гряда

ВВЕДЕНИЕ

Эксплозивный кальдерный вулканизм относится к наиболее опасным природным явлениям, имеющим катастрофические последствия для живой природы, человека и его экономической деятельности. К нему относят сильнейшие взрывные (эксплозивные) извержения, сопровождающиеся массовым выбросом колоссального объема магматического материала (от первых десятков до тысяч кубических километров) и обломков вмещающих пород в виде обломочных лавин, пирокластических потоков и тефры, которые геологически мгновенно (часы–дни) образуют мощные толщи пирокластических отложений. Из-за стремительного опустошения верхних частей магматического очага снижение давления в нем не компенсируется поступлением новых порций магмы. В результате происходит обрушение кровли и/или стенок внутрь магматической камеры, и на поверхности Земли возникает крупная депрессия (рис. 1). Эти де-

прессии принято называть эксплозивными или взрывными кальдерами. Они противопоставляются эфузивным кальдерам, образование которых связывают не с извержениями, а с латеральной миграцией магмы из очага [Cole et al., 2005]. Относительно термина «кальдера» длительное время ведутся активные споры. К настоящему времени исследователи этого вида вулканизма принимают определение данное Х. Вильямсом [1941], в котором кальдерами называются крупные вулканические депрессии, более или менее округлой формы, диаметр которых во много раз больше заключенных в них жерл [Леонов, Гриб, 2004; Cole et al., 2005; и др]. Однако это определение оставляет открытым вопрос: чем отличаются кальдера и крупный кратер. Граница между ними признается весьма условной и устанавливается разными авторами по диаметру депрессии от примерно 1.6 до 2.5 км [Леонов, Гриб, 2004].

Подавляющее большинство эксплозивных кальдер сосредоточено в пределах Тихоокеанского огнен-

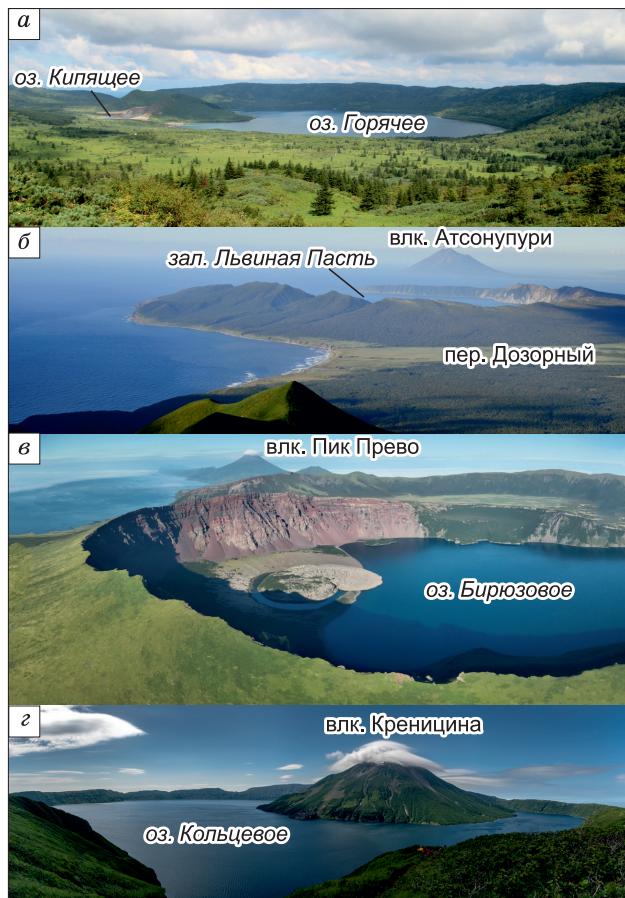


Рис. 1. Примеры кальдер Большой Курильской гряды: *а* – кальдера Головнина (о. Кунашир); *б* – кальдера Левиной Пашь (о. Итуруп) (фото И.А. Кириллова); *в* – кальдерный комплекс Заварицкого (о. Симушир) (фото Т.А. Котенко); *г* – кальдера Тао-Русыр (о. Онекотан).

ного кольца, частью которого является Курило-Камчатская островодужная система с входящей в него Большой Курильской грядой БКГ – цепью вулканических островов, протянувшейся на 1200 км от п-ова Камчатка до северной оконечности о. Хоккайдо (Япония).

Развитие дальневосточных регионов страны требует организации бесперебойной транспортной сети, обеспечения быстрого роста экономики, освоения природных ресурсов региона. Однако активная Курило-Камчатская островодужная система представляет естественную угрозу возникновения эндогенных природных катастроф на самих островах и создания неблагоприятных условий хозяйственной деятельности во всем Дальневосточном регионе. В северной его части, на Камчатском полуострове, вулканические процессы и явления изучаются специалистами разного профиля, ведется мониторинг вулканической и сейсмической активности с использованием современной приборной и методической базы. Голоценовый вулканализм Камчатки изучен до-

статочно подробно, реконструирована история активности большинства действующих вулканов, включая те системы, в которых присутствуют крупные кальдеры обрушения (здесь и далее мы их будем называть *кальдерными вулканами*). Курильские острова в этом отношении изучены существенно хуже: после планомерных геолого-геофизических работ начала второй половины XX в. объем исследований резко сократился. В последующие годы, несмотря на бурное развитие методической базы по определению вещественного состава и абсолютному датированию вулканических пород, работы проводились фрагментарно и в крайне ограниченном объеме. Следует отметить, что наиболее сильные извержения с образованием кальдер в ближайшем геологическом прошлом происходили в южной, наиболее заселенной и хозяйственном освоенной, части островного архипелага, близкой к центрам экономического развития Дальнего Востока – Петропавловску-Камчатскому и Южно-Сахалинску, транспортному центру Ванино. На расстоянии 1000–1100 км от кальдерных вулканов БКГ находятся города Владивосток, Николаевск-на-Амуре и Комсомольск-на-Амуре. Они также могут оказаться под воздействием пеплопадов наиболее мощных эруптивных событий (показатель вулканической активности $VEI \geq 5$). К востоку и западу от гряды Курильских островов проходят авиационные трассы, связывающие страны Юго-Восточной Азии с Северной Америкой и различными регионами Дальнего Востока России. Эксплозивные извержения даже умеренной силы создают помехи авиасообщению, а мощные кальдерообразующие события могут привести к его полной остановке. Это подтверждает актуальность всестороннего изучения кальдерного вулканизма Курильской островной дуги.

Несмотря на высокий риск развития событий катастрофического масштаба, вопросы четвертичного кальдерообразования на Курильских островах и связанных с ним явлений оказались одними из наименее охваченных научными исследованиями и вниманием ученых. Цель данной работы – систематизировать и обобщить опубликованные в разные годы данные по четвертичному кальдерному вулканализму Курильской островной дуги, дополнив их собственными научными результатами, полученными в последние годы, а также продемонстрировать научному сообществу масштабность и актуальность проблематики катастрофических эксплозивных извержений в регионе.

ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ КАЛЬДЕРНОГО ВУЛКАНИЗМА БОЛЬШОЙ КУРИЛЬСКОЙ ГРЯДЫ

Первая вулканологическая экспедиция на острова Большой Курильской гряды была направлена русским правительством в конце XVIII века с целью определения последствий мощного эксплозивного

извержения влк. Райкоке в 1778 г., в результате которого погибло 15 российских зверопромышленников [Горшков, 1967]. Первое специальное исследование вулканов всей Курильской гряды было проведено лишь через 100 лет английским вулканологом на службе Японской империи Дж. Мильном в 1878 г. [Milne, 1879]. Систематические исследования Курильских вулканов начались только в 1946 г. после возвращения Курильских островов в состав СССР [Горшков, 1958, 1967]. В ходе работ этих лет были сделаны генерализованные описания вулканов [Корсунская, 1956; Мархинин, 1959; Горшков, 1960; Остапенко, 1970] и в некоторых случаях – продуктов их извержений [Горшков, 1961; Ostapenko et al., 1967].

Первая, вслед за работами Г.С. Горшкова [1958, 1960], разносторонняя характеристика Курильских островов дана в работе [Erlich, 1986]. В ней описываются 27 кальдер, однако сам автор признавал, что основывалась она прежде всего на данных из ранних каталогов, таких как [Горшков, 1958]. Вслед за этими работами появилось описание активных кальдерных вулканов Курильских островов в обзоре [Newhall, Dzurisin, 1988], где приведены характеристики всего 11 кальдер. Эти авторы в качестве основы также в значительной степени использовали уже упомянутые работы Г.С. Горшкова и Э.Н. Эрлиха. Наиболее поздний обзор информации о вулканах Курильских островов, включая вулканы с кальдерами, приведен в работе [Новейший..., 2005]. Работы на кальдерных вулканах Курильских островов, как будет показано

далее, интенсивно велись в конце XX в. Это было связано главным образом с поиском источников геотермальной энергии. Результаты исследований кислого вулканизма были обобщены в работах [Эрлих, Мелекесцев, 1973; Федорченко и др., 1989], в которых приводятся рассуждения об особенностях распределения во времени этого типа вулканизма Курильских островов, глубинном строении областей его проявления, химизме и происхождении магм, участвующих в этом процессе. Однако в связи с труднодоступностью и малой населенностью региона усилия по изучению активного вулканизма БКГ постепенно ослабли, и многие вопросы, связанные с историей развития вулканизма, тектоникой и глубинными процессами, предваряющими и сопровождающими катастрофические кальдерообразующие извержения, так и остались открытыми. Немалую роль в этом сыграло изменение политического и экономического устройства страны в конце XX – начале XXI вв.

ВОЗРАСТ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ КАЛЬДЕР КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ

Как видно из приведенной исторической справки, по мнению разных исследователей, в пределах БКГ выделяются от 11 до 27 кальдер. Сведения из последних опубликованных сводок о вулканах Курильских островов [Новейший..., 2005; Базанова и др., 2016] показывают, что на Курильских островах расположен

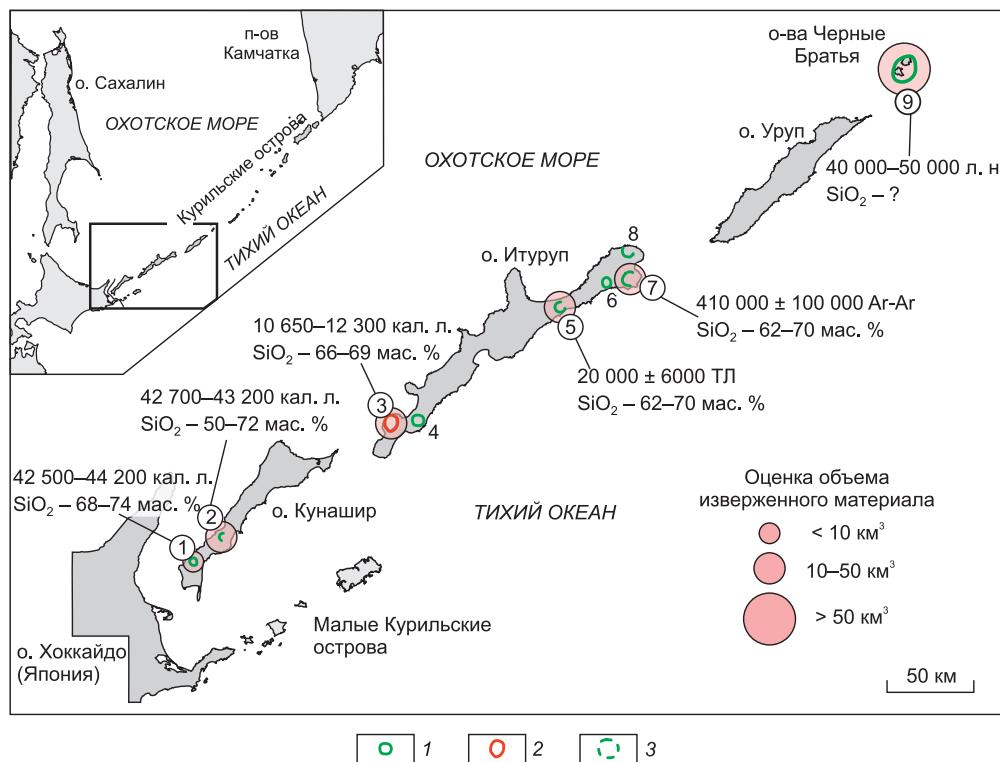


Рис. 2. Кальдеры южного сектора БКГ. Кальдеры: 1 – плейстоценовые, 2 – голоценовые, 3 – предполагаемые. Номера кальдер соответствуют Table S1 (см. доп. материалы).

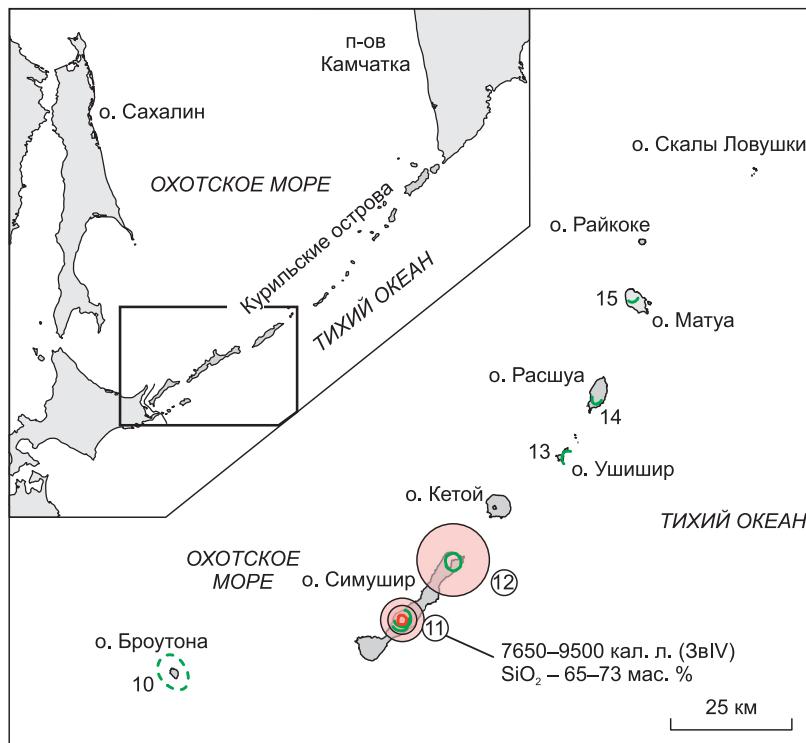


Рис. 3. Кальдеры Центрального сектора БКГ. Усл. обозн. см. на рис. 2.

21 вулкан, где одиночные или вложенные друг в друга кальдеры являются главными морфоструктурными элементами. На рисунках 2–4 показаны 18 вулканов, у которых кальдеры хорошо проявлены в рельефе и/или их вулканическая природа подтверждается соответствующим комплексом пирокластических отложений. Сводная информация об этих кальдерах приведена в дополнительных материалах (<https://elibrary.ru/item.asp?id=79703238>, Table S1).

Традиционно БКГ делится на три сектора: Северный, в который входят острова, расположенные между первым Курильским проливом и проливом Крузенштерна; Центральный – между проливами Крузенштерна и Буссоль и Южный – между проливами Буссоль и Измены [Горшков, 1967; Федорченко и др., 1989].

Четвертичные кальдерные вулканы расположены во всех секторах БКГ, однако распределены неравномерно. Наибольшее их количество наблюдается в Южном секторе (см. рис. 2). Здесь отчетливо выражены семь кальдер на островах Кунашир (Менделеева и Головнина, см. рис. 1, а) и Итуруп (Львиная Пасть (см. рис. 1, б), Урбич, Цирк, Камуй, Медвежья). По данным [Базанова и др., 2016], кальдера Медвежья (10 × 9.5 км) – самая крупная субаэральная кальдера БКГ. В пределах БКГ о. Итуруп является абсолютным лидером по количеству четвертичных кальдер на суше. Аналогичным крупным подводным объектом является кальдера Горшкова (9-пб.11, по [Авдейко и др., 1992]), обнаруженная в районе островов Черные Братья. По данным [Базанова и др., 2016], ее диа-

метр составляет 14 × 11 км. Однако в результатах изучения подводных вулканов Курильской островной дуги указываются меньшие размеры 7.5 × 11.5 км [Авдейко и др., 1992]. Есть также предположение о наличии крупной подводной кальдеры в районе о. Броутона (15 × 9 км) [Новейший..., 2005; Базанова и др., 2016].

Наиболее древним из датированных четвертичных кальдерных извержений БКГ является образование кальдеры Медвежьей на о. Итуруп – 0.41 ± 0.1 млн лет [Ермаков, Штейнберг, 1999 (Ar-Ar)]. Все остальные датировки таких извержений относятся к концу позднего неоплейстоцена (41–12.4 тыс. ^{14}C лет).

К западу от перешейка Ветрового на о. Итуруп расположены выходы толщи пемзовых туфов, достигающей мощности около 264 м [Новейший..., 2005; Smirnov et al., 2019]. Известно, что эта толща образовалась в интервале между $38\ 500 \pm 500$ и 5350 ± 50 л. н. (^{14}C возраст, по [Булгаков, 2018]), или $42\ 400 \pm 700$ и 6120 ± 80 кал. л. н. соответственно (здесь и далее мы приводим значения календарного возраста – кал. л. н., полученного путем калибровки радиоуглеродного возраста, по [Bronk Ramsey, 1995], в программе OxCal v. 4.4.4 (<https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal.html>)). Более точных радиоуглеродных датировок самого извержения нет. По данным термolumинесцентного датирования извержение произошло $20\ 000 \pm 6000$ л. н. [Булгаков, 2018]. По объему пирокластических отложений (~100 км³, по [Мелекесцев и др., 1988]) оно сопоставимо с самыми мощными эксплозивными изверже-

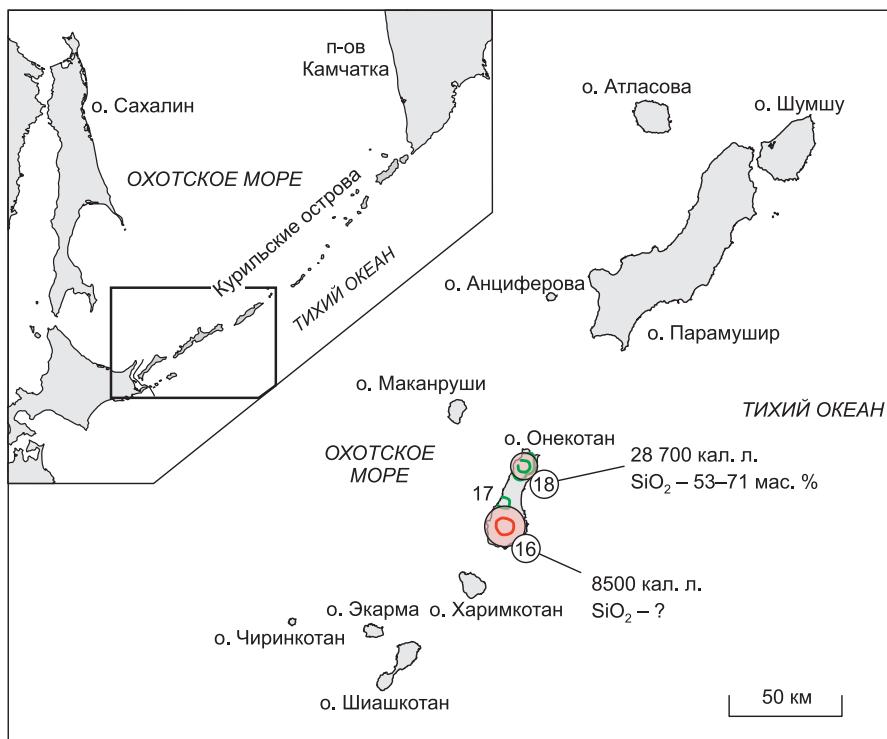


Рис. 4. Кальдеры северного сектора БКГ. Усл. обозн. см. на рис. 2.

ниями Курило-Камчатской островодужной системы. Признаком позднеголоценовой активности этого вулканического центра можно считать недавнюю находку слоя дакитовых пемз с возрастом 2056 ± 60 и 2064 ± 237 кал. лет, по [Бергаль-Кувикас и др., 2023].

Одним из наиболее молодых в Южном секторе, для которого имеются абсолютные датировки кальдерообразования, является влк. Львиная Пасть на о. Итуруп. По данным [Мелекесцев и др., 1974; Braitseva et al., 1995], кальдера этого вулкана образовалась в голоцене $9400 \text{ }^{14}\text{C}$ л. н. (10650 кал. л. н.). Однако в более поздней работе [Дегтерев и др., 2015] даются более древние даты – $12\,260 \pm 220$ и $12\,360 \pm 170$ кал. л. н., отвечающие концу неоплейстоцена.

Площадь островной суши в Центральном секторе БКГ (см. рис. 3) существенно меньше, но он не уступает южному по количеству кальдерных вулканов. Здесь выражены три субаэральных кальдеры и один кальдерный комплекс на островах Расшуд, Матуа и Симушир. Наиболее крупными из них являются кальдеры о. Симушир с диаметрами около 6–7 км (см. рис. 1, в). Предполагается наличие крупной подводной кальдеры в районе островов Ушишир (8×6 км) [Новейший..., 2005; Базанова и др., 2016]. Отмечается, что по сравнению с остальными секторами БКГ именно к Центральному сектору приурочены максимальные объемы вулканизма [Бергаль-Кувикас, 2015].

Данных абсолютных датировок по кальдерообразующим извержениям Центрального сектора БКГ крайне мало. По геоморфологическим признакам

большинство из них имеют поздненеоплейстоценовый возраст [Мелекесцев и др., 1974; Базанова и др., 2016]. Опираясь на геоморфологические особенности кальдеры Заварицкого IV на о. Симушир, возраст породившего ее извержения оценен как голоценовый [Базанова и др., 2016]. Эта оценка согласуется с определениями возраста тефр этого извержения из удаленных разрезов, которые варьируют в пределах 8.5–6.8 тыс. ^{14}C лет (9500–7650 кал. л. н.) [Nakagawa et al., 2008; Дирксен, Рыбин, 2020]. На рубеже неоплейстоцена и голоцена, около 11 500–12 000 л. н., образовалась кальдера Матуа размером 3.5×5 км, формирование которой, вероятно, сопровождалось частичным обрушением докальдерной вулканической постройки [Дегтерев и др., 2012; Рыбин и др., 2017].

Северный сектор БКГ (см. рис. 4) отличается от Южного и Центрального наименьшим количеством неоплейстоцен-голоценовых кальдерных вулканов. Они являются главными центрами четвертичного вулканизма на о. Онекотан. Судя по особенностям рельефа, наиболее древним из них является кальдера Крыжановского, имеющая возраст не древнее позднего неоплейстоцена [Новейший..., 2005]. Самое позднее кальдерообразующее извержение кальдерного комплекса Немо, именуемое Немо III, произошло $24\,500\text{--}25\,000$ тыс. ^{14}C л. н. ($28\,700 \pm 600$ кал. л. н.) [Мелекесцев и др., 1997]. Самое молодое из таких событий на Онекотане связано с самым крупным вулканическим центром острова – кальдерой Тао-Русыр (см. рис. 1, г) – 7500 ± 80 ^{14}C л. н. (8400 кал. л. н.) [Ме-

лекесцев и др., 1974; Braitseva et al., 1995]. Кроме этого, в разных работах упоминаются кальдеры о. Кетой, небольшие кальдеры вулканов хр. Грозного, влк. Атсонопури и вулканотектоническая депрессия п-ова Чирип на о. Итуруп, вулканов Кунтоминтар и Синарка на о. Шиашкотан, кальдера на о. Харимкотан и на влк. Тятя [Erlich, 1986; Рыбин и др., 2015; и др.], которые мы здесь не рассматриваем из-за их малых размеров, а также потому что их выделение является предметом дискуссии и требует уточнения.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ КАЛЬДЕР

Подобных данных о строении и геологической позиции эксплозивных кальдер плейстоценового и голоценового возраста на островах БКГ существенно меньше, чем для кальдер Восточного вулканического пояса и Южной Камчатки. В настоящее время наиболее подробная геологическая информация, включающая детальные геологические карты и схемы и описание разрезов пирокластических отложений, есть только по двум из них: кальдере Немо (о. Онекотан) [Мелекесцев и др., 1997] и кальдере Медвежья (о. Итуруп) [Остапенко, 1970; Ермаков, Семакин, 1996; Ермаков, Штейнберг, 1999]. Причем интерес к кальдере Медвежья обусловлен не столько изучением кальдерообразования, сколько интересом к посткальдерному этапу, с которым связана рудная минерализация в кратере влк. Кудрявый, и проявление высокомагнезиальных базальтов [Кузьмин и др., 2023; Maryunov et al., 2023].

При рассмотрении геологического строения кальдерных вулканов принято выделять докальдерные образования, морфоструктуры и отложения, возникшие в ходе кальдерообразования (синкальдерные), и посткальдерные образования.

По положению относительно более ранних вулканических построек (докальдерных образований) кальдеры обрушения, возникшие при извержении средних и кислых магм, предложено разделить на приуроченные к одному вулканическому аппарату (группа Б¹) и секущие разные вулканические постройки (группа В) [Erlich, 1986; Леонов, Гриб, 2004].

Подавляющее большинство кальдер БКГ относится к группе Б. Они приурочены к вершинам крупных одиночных щитовых вулканов и стратовулканов, которые и являются докальдерными образованиями. Наиболее ярким примером этих кальдер является кальдера Тао-Русыр (о. Онекотан). К группе В относятся крупные кальдеры, такие как, например, Медвежья (о. Итуруп), Менделеева (о. Кунашир), Немо

(о. Онекотан). Как правило, эти кальдеры заложены на выровненной поверхности неогеновых и неоген-четвертичных вулканических построек. В обоих случаях образование кальдерного вулкана может быть отделено от предшествующего вулканизма длительным периодом покоя. Для кальдерного комплекса Немо этот период был оценен в ~ 650 тыс. лет (Мелекесцев и др., 1997]. Примерно такой же разрыв (~ 600 тыс. лет) предполагается между образованием последних докальдерных вулканитов и кальдерой Медвежья [Ермаков, Штейнберг, 1999]. К группе В, по-видимому, относится и кальдера Головнина на о. Кунашир.

Особое место среди центров кальдерообразующих извержений БКГ занимает перешеек Ветровой на о. Итуруп. Считается, что извержение, породившее мощную толщу пемзовой пирокластики в этом районе, произошло в прибрежной зоне позднеоплейстоценового морского пролива, разделявшего горные массивы нынешнего хр. Грозного и п-ова Медвежьего [Afanasiev et al., 2020]. Вулканические структуры, которые можно отнести к докальдерному этапу, судя по данным [Ковтунович и др., 2002], имеют плиоцен-эоплейстоценовый возраст, т. е. существенно оторваны от образования пирокластической толщи во времени. Необычной особенностью этого вулканического образования является то, что при достаточно большом объеме пирокластики на суше нет отчетливо выраженных признаков кальдеры (кольцевых эскарпов, округлой или овальной депрессии и т. п.). Таким образом, положение эруптивного центра до сих пор точно не установлено. Разные авторы помещают его либо в центр перешейка Ветрового [Горшков, 1967], либо в залив Простор [Авдейко и др., 1992; Новейший..., 2005].

По имеющимся данным, на островах БКГ присутствуют как одноактные кальдеры, так и комплексы, включающие в себя несколько вложенных кальдер. К первым относятся кальдеры Головнина, Тао-Русыр, Броутона (Симушир). Вложенные кальдеры входят в состав комплексов вулканов Немо (Немо I, Немо II и Немо III) и Заварицкого (Заварицкого I, Заварицкого II, Заварицкого III, Заварицкого IV) [Новейший..., 2005; Базанова и др., 2016]. Данные сейсмоакустических и стратиграфических исследований показали, что влк. Львиная Пасть на о. Итуруп также состоит из двух вложенных друг в друга кальдер [Бондаренко, 1991; Дегтерев и др., 2015].

При мощном эксплозивном извержении на острове значительная часть пирокластического материала выбрасывается в море, на суше его отложения могут сохраняться фрагментарно и легко подвергаются эрозии [Мелекесцев и др., 1997]. Изверженный материал при эксплозивном кальдерообразовании включает отложения ближней зоны (проксимальные отложения), представленные массивными толщами туфов и игнимбритов, отложениями обломочных лавин,

¹ Использована классификация кальдер, по [Леонов, Гриб, 2004]: группа А – кальдеры базальтовых вулканов; группы Б–Г – кальдеры вулканов среднего и кислого состава: Б – приуроченные к одной вулканической постройке, В – срезающие несколько вулканических аппаратов, Г – кальдеры в районах, где вулканизм на докальдерных этапах отсутствовал или был незначительным.

баллистического материала, и слои тефры дальнего разноса (дистальные отложения), доля которой обычно значительна. Мощные толщи проксимальных отложений известны у вулканов Головнина, Менделеева, Львиная Пасть, Медвежья, Немо III. Мощности проксимальных отложений могут достигать нескольких десятков и даже сотен метров. Например, на перешейке Ветровом на о. Итуруп толща туфов достигает максимальных отметок высот 260 м при том, что их подошва находится ниже уровня моря.

Дистальная тефра кальдерных извержений способна распространяться на огромных площадях в десятки и сотни миллионов квадратных километров, формируя тефростратиграфические реперы в наземных и морских осадках [Ponomareva et al., 2015]. Однако для кальдер БКГ сведения о находках их тефры в почвенных разрезах и кернах скважин глубоководного бурения ограничены единичными объектами.

Наличие дистальной тефры, сходной по составу с продуктами извержений кальдеры Заварецкого на о. Симушир, установлено в кернах скважин в центральной части Охотского моря [Derkachev et al., 2016] и в разрезах почв на всех островах к северу от Симушира [Nakagawa et al., 2008; Дирксен, Рыбин, 2018, 2020] на расстоянии до 700 км от эруптивного центра. Есть также предположение, что эти тефры встречаются на Камчатке [Дирксен, Рыбин, 2020]. Сведения о наличии в почвенных отложениях островов Южного и Центрального секторов дистальной тефры мощного (VEI 4–5) извержения, произошедшего в районе перешейка Ветрового около 2000 л. н., изложены в [Бергаль-Кувикас и др., 2023]. Эта тефра формирует горизонт СКг, выделенный [Nakagawa et al., 2008] на удалении до 400 км от эруптивного центра. Тефра влк. Немо встречается в колонках глубоководного бурения в Охотском море [Деркачев, Портнягин, 2013]. В колонках глубоководного бурения в Охотском море и на подводной горе Дейтrot Императорского хребта (северо-западная часть Тихого океана) описаны пеплы, предположительно относящиеся к вулканам Курильских островов [Ponomareva et al., 2023].

К синкальдерному этапу также относятся экструзивные купола, образующиеся в ходе извержения остаточных дегазировавших порций магмы, располагаясь, как правило, вдоль кольцевых разломов. Примером широкого развития таких куполов является кальдера Менделеева, где более 20 синкальдерных экструзий прорывают пемзово-пирокластическую толщу кальдерного извержения [Kotov et al., 2023]. Однако информация об экструзивном синкальдерном вулканизме в пределах всего региона крайне обрывочна и требует дальнейших детальных геологических исследований.

Посткальдерный вулканизм характерен для всех рассматриваемых эруптивных центров, за исключением кальдер Львиная Пасть, Урбич и Цирк, расположенных на о. Итуруп. Здесь следует отметить, что в случае кальдерных комплексов мы вслед за [Леонов, Гриб, 2004] рассматриваем образование серии вложенных кальдер как части кальдерного этапа. Однако образование последней кальдеры (IV) в кальдерном комплексе влк. Заварецкого (о. Симушир) связывают с обрушением посткальдерного вулкана [Новейший..., 2005]. В подавляющем большинстве случаев посткальдерные вулканы БКГ образовались в позднем неоплейстоцене–голоцене (см. доп. материалы, Table S1). Многие из них остаются активными и в настоящее время.

Посткальдерный вулканизм выражен в образовании стратовулканов и экструзивных куполов. Все они располагаются во внутренних частях кальдерных депрессий, иногда на краях кальдер. В кальдерах Медвежья и Горшкова результатом посткальдерного вулканизма стало образование сложных построек в виде горных хребтов, пересекающих кальдерные депрессии. Небольшие кальдеры на островах Расшуда и Матуа в значительной мере перекрыты продуктами деятельности посткальдерных вулканов Расшуда и Пика Сарычева, поэтому в рельефе почти не выражены.

ХИМИЗМ МАГМ И ПАРАМЕТРЫ СТАНОВЛЕНИЯ ОЧАГОВ КАЛЬДЕРНОГО ВУЛКАНИЗМА

В настоящее время наиболее распространенной является точка зрения, что мощные эксплозивные извержения вулканов, сопровождающиеся образованием крупных кальдер обрушения, связаны с очагами высококремнистых вязких магм, богатых летучими компонентами [Bachmann, Bergantz, 2008]. Принимая во внимание масштабы кальдерных извержений, следует заметить, что эти очаги могли содержать от менее 10 до нескольких тысяч кубических километров таких магм. Из этого следует, что эндогенные процессы, предшествующие кальдерообразующим извержениям, должны были иметь значительные масштабы и длительность.

Вопросы генезиса магм и физико-химических параметров кальдерного вулканизма БКГ изучены значительно меньше, чем геологическое строение и хронология извержений. В первой обобщающей статье [Эрлих, Мелекесцев, 1973] на основе петрохимических данных было показано, что кислые магмы кальдер БКГ отделяются от мантийных и локализуются на глубинах более 15 км, тем самым исключая процесс плавления сиалических коровых пород как возможный механизм их образования. Сложившееся представление долгое время не оспаривалось, так как петрологические и геофизические исследования БКГ почти не проводились. Новые данные, полученные с использованием современных аналитических подходов и появившиеся в работах последних двух десяти-

летий, позволили по-новому взглянуть на образование кислых магм БКГ.

Сводная информация о валовых составах вулканитов поздненеоплейстоцен-голоценовых кальдерообразующих извержений БКГ и результатов электронно-зондовых анализов стекол их основной массы приведены в доп. материалах, Tables S2, S3. В настоящее время подробные данные о петрографическом и геохимическом составе продуктов кальдерообразующих извержений БКГ имеются только по нескольким отдельным вулканам – кальдерам Менделеева [Kotov et al., 2023], Львиная Пасть [Ostapenko et al., 1967; Smirnov и dr., 2017]; перешейку Ветровому [Ostapenko, 1967; Smirnov et al., 2019]; кальдере Медвежьей [Ostapenko et al., 1967; Остапенко, 1970; Maryunov et al., 2023], кальдере Заварыцкого [Ostapenko et al., 1967] и кальдере Немо III [Мелекесцев и dr., 1997].

Отложения кальдерообразующих извержений представлены игнимбритами, пемзовыми, лапиллиевыми и пепловыми туфами. В зарубежной литературе принято называть любые отложения пемзовых пирокластических потоков, независимо от степени их спекания, игнимбритами [Sparks et al., 1973; Giordano, Cas, 2021], придавая термину генетическое значение. Тем не менее в этой статье мы будем придерживаться разделения пирокластических пород на туфы, которые характеризуются низкой степенью спекания, и игнимбриты – спекшиеся пирокластические породы со структурами фьямме [Лучицкий, 1971], придавая термину более петрографический смысл. Игнимбриты отмечены в разрезах проксимальной пирокластики кальдер Медвежьей, Заварыцкого и Немо III [Ostapenko et al., 1967; Остапенко, 1970; Ермаков, Штейнберг, 1999; Мелекесцев и dr., 1997]. Пемзовые туфы присутствуют во всех без исключения отложениях кальдерной пирокластики. Среди изученных нами пород неопределенное отношение к кальдерообразованию имеют внутрикальдерные отложения риодацитовых пемз, приуроченные к посткальдерному влк. Меньший Брат в кальдере Медвежьей. Но так как они по своим структурно-текстурным особенностям и геохимически близки к пемзам кальдерных извержений других вулканов БКГ, мы будем их рассматривать совместно с ними.

На рисунках 5 и 6 приведены составы пемз и игнимбритов четвертичных кальдерообразующих извержений БКГ, данные по которым имеются у авторов и опубликованы в доступной литературе. Мы считаем, что составы пемз в наибольшей степени отвечают составам магм, в отличие от игнимбритов. Составы последних могут представлять собой смесь магматического (ювенильного) и обломочного (результатного) материалов. Химизм представленных пород варьирует в широком диапазоне содержаний кремнекислоты – от базальтов до риолитов. При этом преобладают дацитовые и риодацитовые составы (среднее содержание SiO_2 67 мас. %). Наиболее низ-

кими содержаниями кремнезема обладают, как правило, игнимбриты, в то время как пемзы являются более кислыми. Самые высокие содержания кремнезема, по имеющимся данным, характерны для внутрикальдерных пемз влк. Меньший Брат (см. рис. 5). В толще дацитовых туфов кальдеры Головнина присутствуют горизонты полосчатых пемз с мегакристаллами анортита и крупными сростками анортита и оливина, которые по валовому составу отвечают базальтам и андезибазальтам – наиболее низкокремнистым образованиям в имеющейся выборке.

Игнимбриты и пемзы кальдерных извержений на рис. 5, б относятся к низко- и умеренно-калиевым сериям. Они группируются вблизи границы между магнезиальными и железистыми составами (см. рис. 5, в). Составы пемз и игнимбритов кальдерных извержений о. Итуруп и кальдеры Немо III группируются вблизи границы низко и умеренно-калиевых серий (K_2O 1.2 мас. % в среднем), а о. Кунашир и кальдеры Заварыцкого на о. Симушире относятся к низкокалиевым (K_2O 0.79 мас. % в среднем). Среди главных оксидов щелочных металлов в их составах преобладает натрий ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 2.4$). Подавляющее большинство составов попадает в поле умеренно-глиноземистых или на границу между умеренно- и высокоглиноземистыми (A/CNK 0.95 в среднем) (см. рис. 5, г). Небольшая часть пемз и игнимбритов кальдер Заварыцкого, Головнина и Медвежьей находится в поле высокоглиноземистых составов. Породы кальдерообразующих извержений БКГ обогащены CaO (в среднем около 4 мас. %) при нормальном и пониженном содержании щелочей, в связи с чем их составы классифицируются как известковые (см. рис. 5, д). Наиболее значимые отличия заметны в содержаниях Na_2O и K_2O , причем особенно в K_2O . Игнимбриты и пемзы кальдер островов Кунашир и Итуруп характеризуются пониженными суммами этих компонентов. Они попадают в поле пород низкой щелочности (см. рис. 5, а). Игнимбриты кальдеры Немо III на о. Онекотан – немного повышенными и попадают в нижнюю часть поля нормальной щелочности (см. рис. 5, а).

Перечисленные выше особенности составов делают ювенильный материал кальдерных извержений похожим на островодужные и офиолитовые плагиограниты, которые являются аналогами интрузивных *M*-гранитов, по [White, 1979] (см. рис. 5, е), образующихся за счет плавления коровых базитовых субстратов.

По мере возрастания кремнекислотности продукты кальдерообразующих извержений, составы которых приведены на рис. 6, обедняются FeO , MgO , CaO и Al_2O_3 и обогащаются K_2O и Na_2O .

Главными минералами в ассоциации вкрапленников в пемзах являются плагиоклаз, состав которого варьирует в широком диапазоне (An_{40-95}), клинопироксен (авгит-диопсид), ортопироксен (гиперстен) и

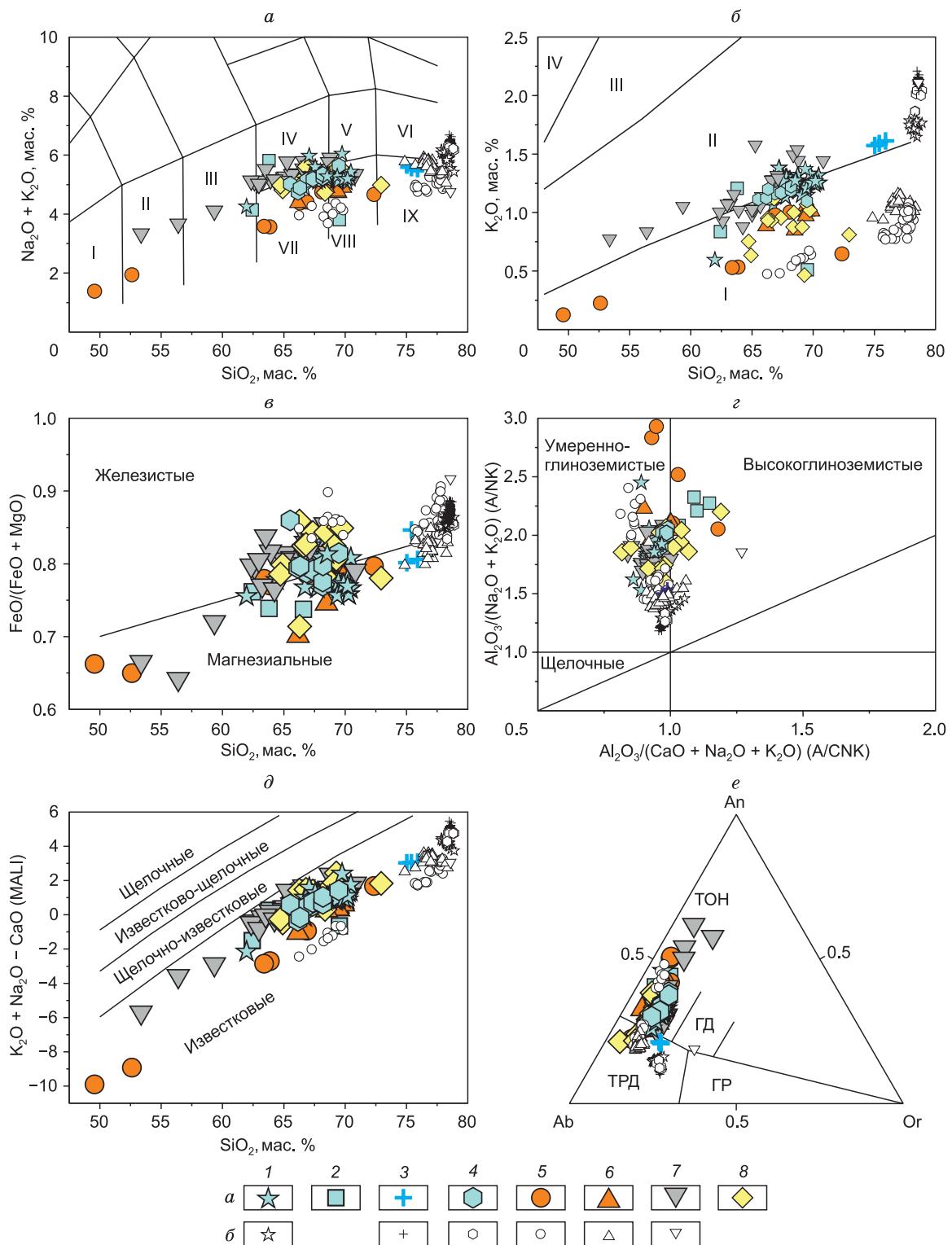


Рис. 5. Составы пород и стекол основной массы пемзы и игнимбритов кальдерных извержений БКГ (mas. %). Остров Итуруп: 1 – пемзы перешейка Ветрового; 2 – пемзы и игнимбриты кальдеры Медвежьей; 3 – пемзы влк. Меньший Брат; 4 – пемзы кальдеры Львиная Пасть. Остров Кунashir: 5 – пемзы кальдеры Головнина; 6 – пемзы кальдеры Менделеева. Остров Онекотан: 7 – пемзы и игнимбриты кальдеры Немо III. Остров Симушир: 8 – пемзы кальдерных извержений комплекса Заварыцкого. *a* – валовые составы пород, *б* – составы стекол основной массы: I – базальт, II – андезибазальт, III – андезит, IV – дацит, V – риодицит, VI – риолит, VII – низкощелочной дацит, VIII – низкощелочной риодицит, IX – низкощелочной риолит; *б*: I – низкокалиевая серия, II – умеренно-калиевая серия, III – высококалиевая серия, IV – ультратралиевая серия; *е*: ТОН – тоналит, ТРД – трондемит, ГД – гранодиорит, ГР – гранит. Дискриминационные диаграммы по [Петрографический кодекс, 2008] (*a*), [Rickwood, 1989] (*б*), [Frost, 2001] (*б*), [Shand, 1943] (*е*), [Frost, 2001] (*д*), [Barker, 1979] (*е*).

титаномагнетит. Иногда присутствует ильменит. Среди вкрапленников в наиболее высококремнистых пемзах присутствует кварц. Вкрапленники амфибала — низкоглиноземистой магнезиальной роговой обманки — обнаружены в пемзах кальдер Львиная

Пасть [Смирнов и др., 2017], Матуа (устное сообщение А.В. Рыбина) и Расшуа [Горшков, 1967]. Также реликты амфиболов – высокоглиноземистой магнезиальной роговой обманки, чермакита, магнезиогастингсита, были установлены в клино- и ортопирок-

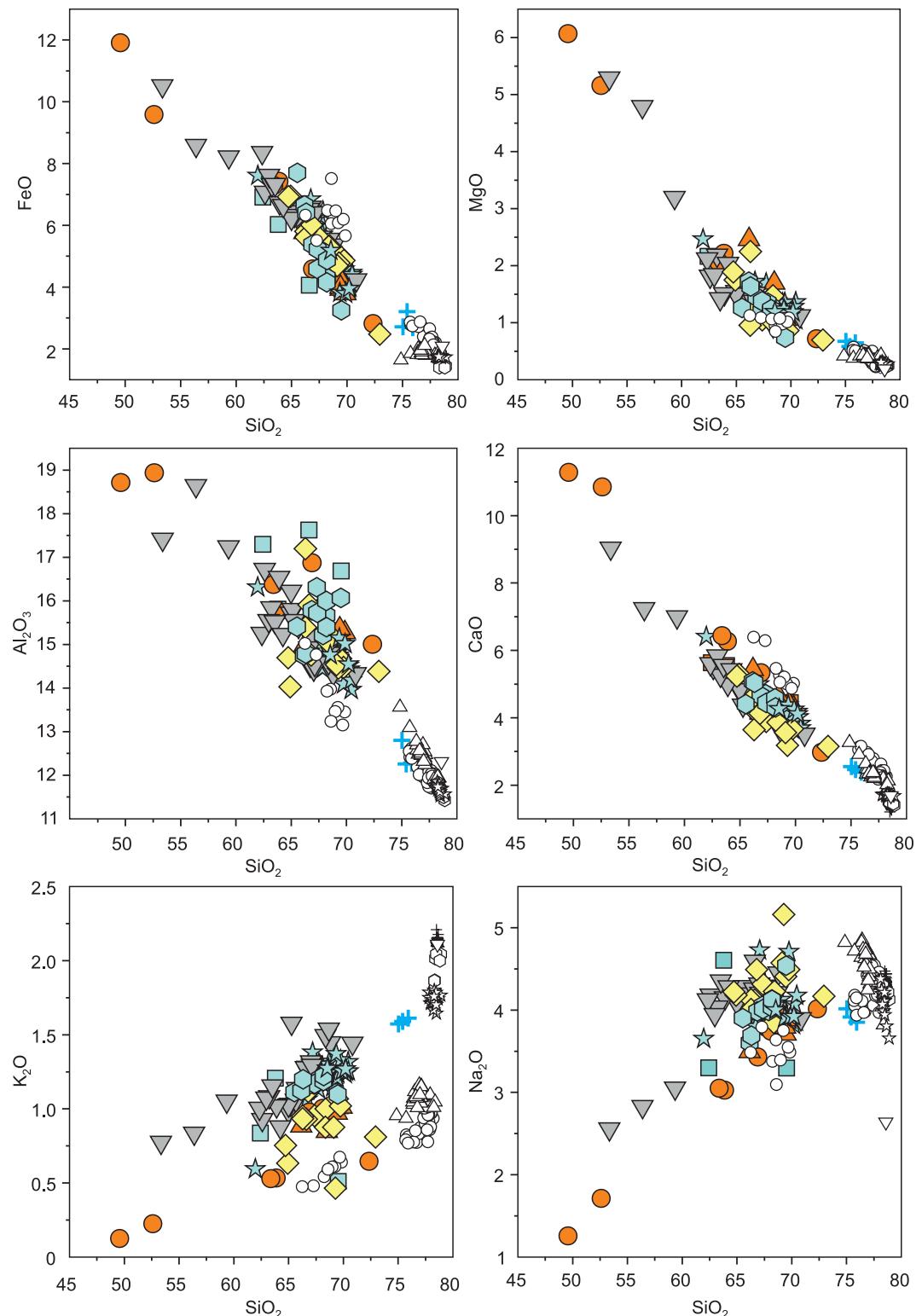


Рис. 6. Вариационные диаграммы для составов пород и стекол основной массы пемз и игнимбритов кальдерных извержений БКГ (мас. %). Усл. обозн. см. на рис. 5.

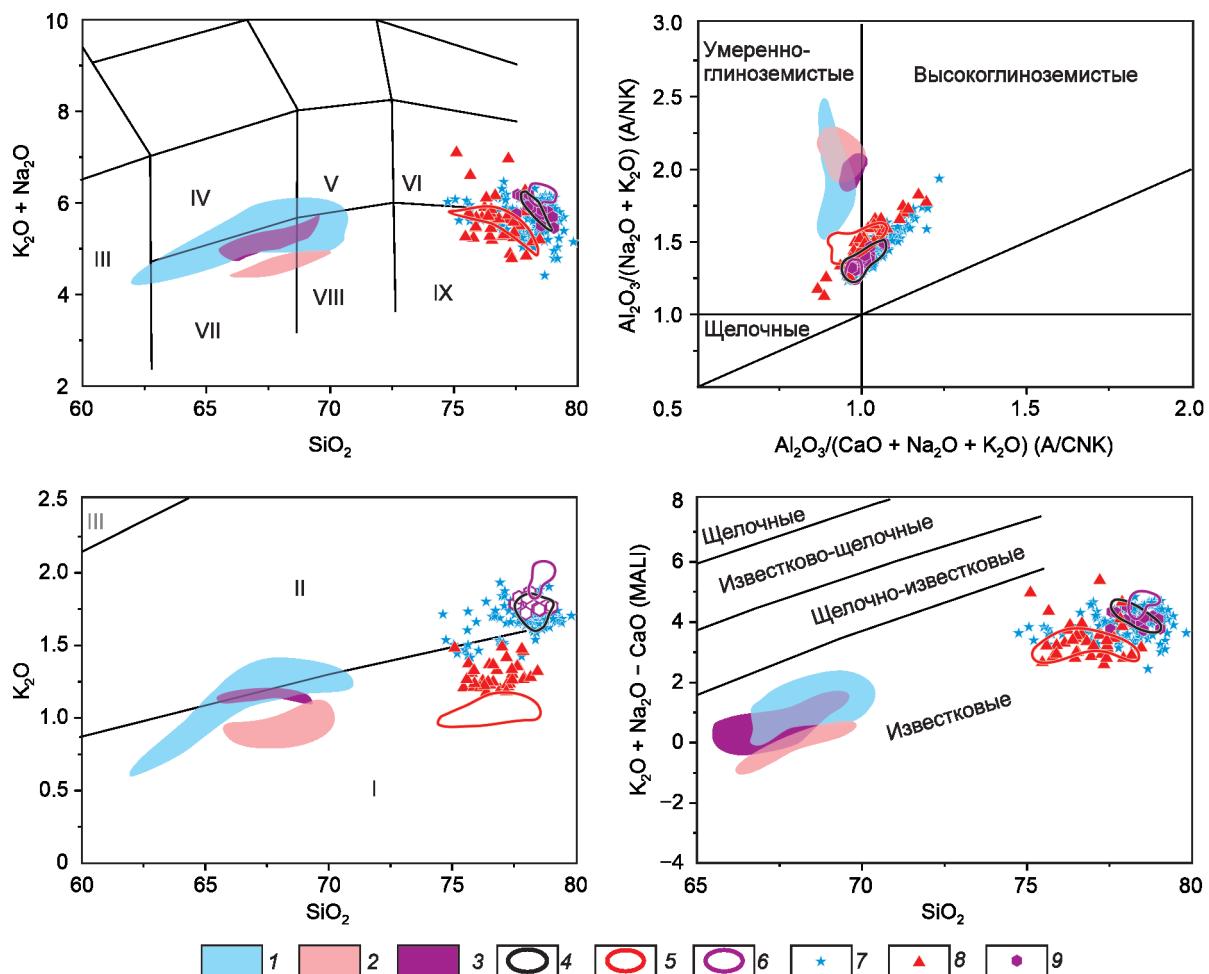


Рис. 7. Составы стекол расплавных включений в минералах пемз кальдерных извержений островов Южного сектора БКГ (мас. %) в сравнении с валовыми составами пемз и составами стекол их основной массы. I–3 – валовые составы пемз: 1 – перешеек Ветровой (о. Итуруп), 2 – кальдера Менделеева (о. Кунашир), 3 – кальдера Львиная Пасть (о. Итуруп); 4, 5 – составы стекол основной массы пемз: 4 – перешеек Ветровой, 5 – кальдера Менделеева; 6 – кальдера Львиная Пасть; 7, 8 – составы стекол расплавных включений: 7 – перешеек Ветровой, по [Smirnov et al., 2019], 8 – кальдера Менделеева, по [Kotov et al., 2023]; 9 – кальдера Львиная Пасть, по [Смирнов и др., 2017; Котов и др., 2021]. Подробные объяснения см. на рис. 5.

сенах пемз кальдерных извержений перешейка Ветрового (о. Итуруп) [Smirnov et al., 2019] и влк. Менделеева (о. Кунашир) [Kotov et al., 2023].

Валовые составы вулканических пород дают общие представления о химизме изверженного вещества. Пирокластические породы взрывных извержений, помимо ювелирного материала, содержат ксенолиты горных пород, через которые проходит подъем магмы к поверхности, а также обломочный материал стенок подводящих каналов и вулканических построек, образующийся при взрыве. Информация, позволяющая с большей точностью характеризовать состав магм и реконструировать процессы подготовки извержений, сосредоточена в составах расплавов и может быть получена путем анализа свежих стекол основной массы и расплавных включений во вкрапленниках.

В последнее время появились данные о составах расплавных включений в минералах пемз крупных кальдерообразующих извержений позднего неоплейстоцена на островах БКГ. Они имеются для вулканов Менделеева (о. Кунашир) [Kotov et al., 2023], Львиная Пасть (о. Итуруп) [Смирнов и др., 2017] и толщи дацитовых пемз на перешейке Ветровом (о. Итуруп) [Smirnov et al., 2019]. Опубликованные данные по составам стекла основной массы продуктов кальдерообразующих извержений немногочисленны и включают результаты исследования дацитовых пемз перешейка Ветрового и влк. Львиная Пасть, а также внутрикальдерных риолитовых пемз кальдеры Медведь [Бергаль-Кувикас и др., 2023]. Единичные анализы стекол основной массы из пород извержений кальдер Немо III, Головнина и Менделеева приводятся в работах [Мелекесцев и др., 1997; Razzhigaeva et al., 2016].

Сводка по составам природно-закаленных стекловатых расплавных включений в минералах пемз кальдерных извержений Южного сектора БКГ приведена в доп. материалах, Table S4. Несмотря на быструю закалку, стекла включений могут отличаться

от состава расплава, из которого кристаллизовался содержащий их минерал, из-за постзахватной кристаллизации вещества на стенки включений. На рисунках 7 и 8 видно, что составы стекол основной массы близки к составам расплавных включений в

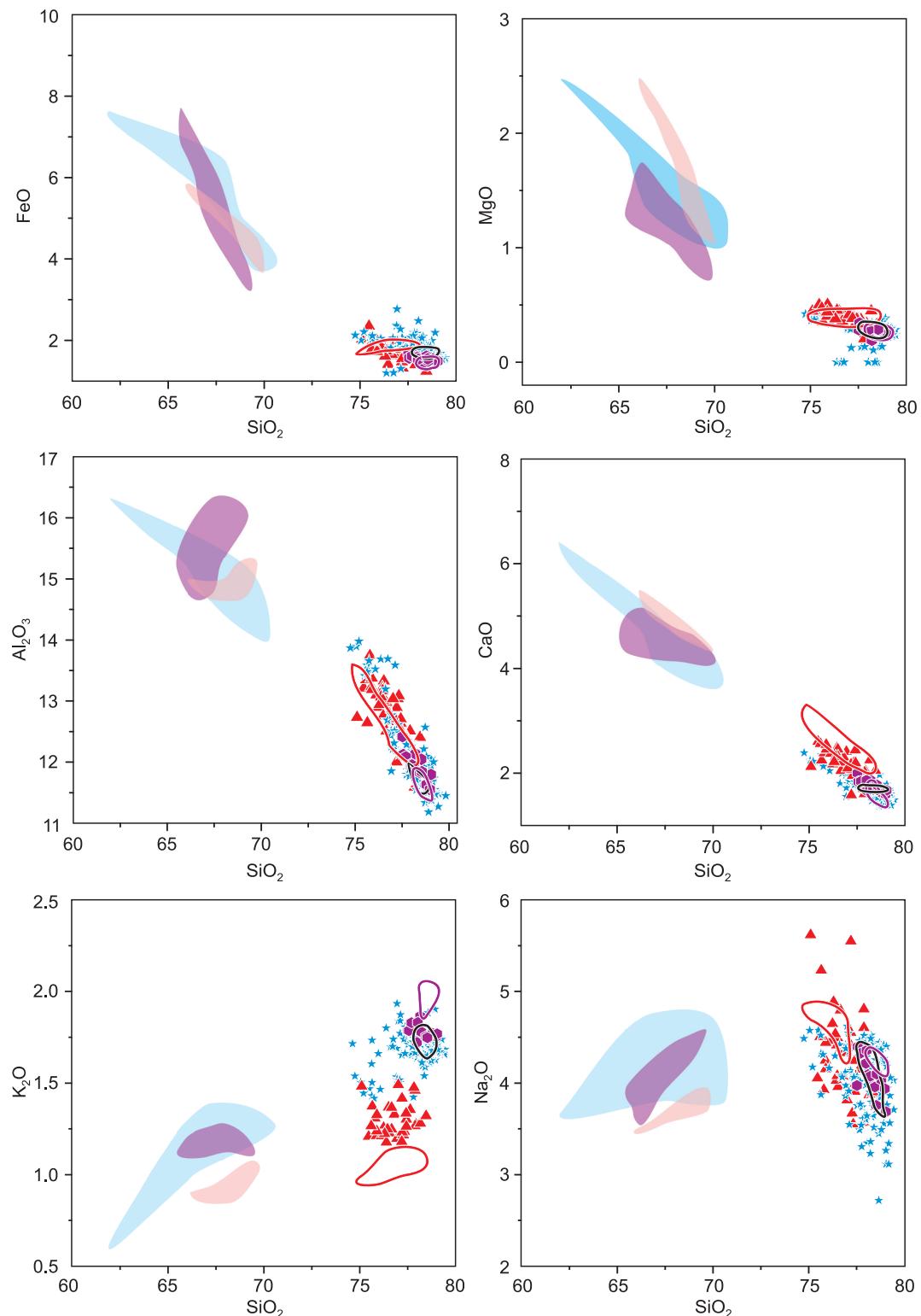


Рис. 8. Вариационные диаграммы для составов стекол расплавных включений в минералах пемз кальдерных извержений Южного сектора БКГ (мас. %). Усл. обозн. см. на рис. 7.

магматических минералах. Это предполагает, что постзахватная кристаллизация не оказала существенного влияния на составы расплавов во включениях, и их можно считать представительными для минералообразующей среды (детальное описание методических подходов в [Смирнов и др., 2017; Smirnov et al., 2019; Котов и др., 2021; Kotov et al., 2023]). В то же время составы расплавных включений и стекол основной массы резко отличаются от валовых составов пород. В некоторых случаях они составляют с валовыми составами единый эволюционный тренд, но чаще лежат в стороне от него. На диаграмме K_2O – SiO_2 (рис. 9) дано сравнение составов стекол основной массы пемз и игнимбритов неоплейстоцен-голоценовых кальдерных извержений БКГ с составами стекол основной массы продуктов кальдерных извержений о. Хоккайдо и пепловых частиц из осадков Охотского моря, по данным [Razzhigaeva et al., 2016; Derkachev et al., 2016].

При заметных вариациях валовых составов пемз диапазон вариаций составов расплавов кальдеры Львиная Пасть, перешейка Ветрового и риолитовой пемзы влк. Меньший Брат (кальдера Медвежья) крайне узок (см. рис. 5). Содержание SiO_2 варьирует в пределах 77.8–78.9 мас. %. Несколько шире он для расплавов кальдер Менделеева и Головнина, что согласуется с более широким диапазоном вариаций составов самих пемз. На основании предварительных данных по составам стекол основной массы пемз

кальдеры Головнина можно увидеть, что они разбиваются на две группы, одна из которых по содержанию SiO_2 подобна составам расплавов кальдерных извержений о. Итуруп и кальдеры Менделеева, а другая имеет более основные составы. Последняя отвечает базальтовым пемзам из разреза пирокластики на юго-восточном склоне кальдеры.

Опираясь на данные по составам стекол расплавных включений и основной массы пемз, можно сделать заключение, что составы расплавов в сравнении с валовыми составами пород существенно обогащены SiO_2 и щелочами на фоне резкого обеднения CaO , Al_2O_3 , MgO и FeO (см. рис. 7).

Расплавы, из которых кристаллизовались вкрапленники кислых пемз, имели состав низко- и умеренно-калиевые известковистых риолитов (плагиориолитов) (см. рис. 7). Наиболее низкокалиевыми оказались расплавы кальдеры Менделеева и Головнина. Расплавы кальдер о. Итуруп обогащены калием по сравнению с кальдерами о. Кунашир. Наиболее низкими содержаниями K_2O для кальдер о. Итуруп обладают расплавы перешейка Ветрового, а расплавы кальдерного влк. Львиная Пасть и риолитов кальдеры Медвежьей, напротив, обогащены K_2O .

Найдки сростков магнезиальных пироксенов с комбинированными включениями, представленными риолитовым стеклом и реликтами амфибола, значительный отрыв валовых составов пород от составов стекол расплавных включений, низкая вариатив-

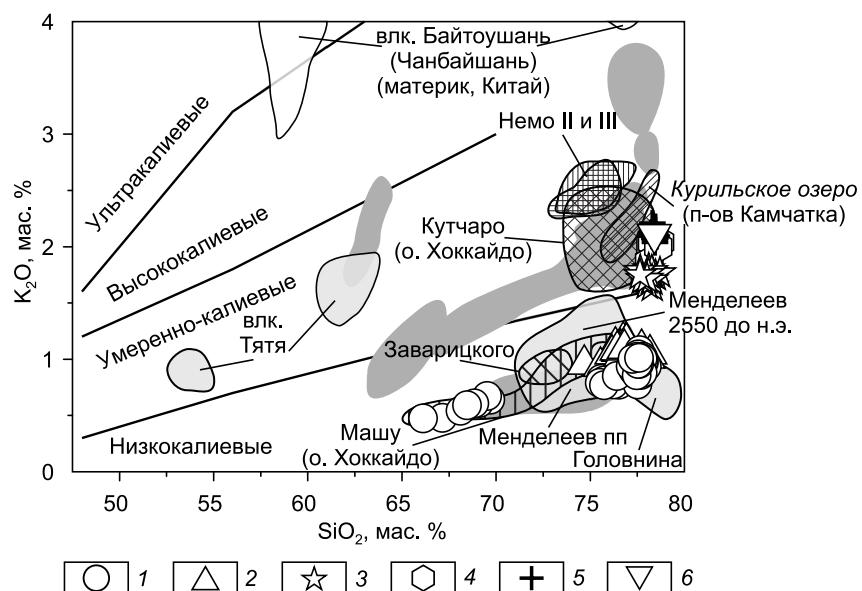


Рис. 9. Сопоставление составов стекол основной массы пемз и игнимбритов эксплозивных кальдерных вулканов БКГ с кальдерными вулканами о. Хоккайдо (Япония) и стеклами пепловых частиц из осадков Охотского моря. Контуры полей составов стекол проксимальных тефр вулканов о. Хоккайдо (темно-серые), Южных Курил (светло-серые) и влк. Байтоушань (Чанбайшань) (белые), по [Razzhigaeva et al., 2016]; контуры полей составов стекол тефр из осадков Охотского моря (штриховка), по [Derkachev et al., 2016]. Составы стекол основной массы проксимальных пемз и игнимбритов: 1, 2 – о. Кунашир (1 – кальдера Головнина (данные авторов); 2 – кальдера Менделеева (данные авторов)); 3–5 – о. Итуруп (3 – перешейк Ветровой, по [Smirnov et al., 2019; Бергаль-Кувикас и др., 2023], 4 – кальдера Львиная Пасть, по [Бергаль-Кувикас и др., 2023], 5 – риолитовые пемзы в влк. Меньший Брат, кальдера Медвежья, по [Бергаль-Кувикас и др., 2023]); 6 – о. Онекотан, кальдера Немо-III, по [Мелекесцев и др., 1997]; пп – позднеплейстоценовый.

ность составов по содержаниям FeO, MgO и в некоторых случаях по CaO позволили сделать важный вывод о том, что образование расплава перед извержениями на перешейке Ветровом (о. Итуруп) и образованием кальдеры Менделеева (о. Кунашир), вероятно, связано с перитектической реакцией разложения амфибола и образованием высокоглиноземистого плагиориолитового расплава, «габброноритового» рестита (высококальциевый плагиоклаз + клинопироксен + ортопироксен + магнетит) и последующей кристаллизацией основного плагиоклаза [Smirnov et al., 2019; Kotov et al., 2023].

Перитектические реакции разложения амфибола являются типичными для обстановок плавления пород земной коры при образовании кислых магм. Дацитовый состав магм кальдерообразующих извержений на перешейке Ветровом, в кальдере влк. Менделеева, а также на других подобных вулканах, извергавшихся в позднем неоплейстоцене, вероятно, является следствием перемешивания расплава с минералами реститового парагенезиса. Оценки параметров частичного плавления, приведшего к появлению кислых магм, показывают, что оно происходило в верхних частях островодужной земной коры на глубинах не более 12 км при температурах около 810–930 °C [Kotov et al., 2023].

Оценки температур кристаллизации кварца и плагиоклаза лежат в диапазонах, сходных с температурами частичного плавления коровых субстратов 830–890 °C при давлениях, не превышающих 2–3 кбар [Smirnov et al., 2019; Kotov et al., 2023], т. е. в пределах глубин, на которых происходило частичное плавление.

Одним из важнейших факторов, способствующих развитию мощных кальдерообразующих извержений, является флюидный режим участающих в этих процессах магм. Под флюидным режимом понимаются условия существования летучих компонентов и функционирования флюидных фаз в магмах: *PT*-параметры и формы растворимости, агрегатное состояние флюидных фаз. Наиболее подробные данные, проливающие свет на флюидный режим магм кальдерообразующих извержений БКГ, опубликованы в тех работах, которые посвящены извержениям на перешейке Ветровом и в кальдере влк. Менделеева [Smirnov et al., 2019; Kotov et al., 2023]. Магматические расплавы в очагах этих извержений были обогащены летучими, среди которых главную роль играют H₂O (до 7.2 мас. % в расплаве) и Cl (до 0.4 мас. % в расплаве). В то же время содержания CO₂ и S в расплавах крайне низки и не превышают, соответственно, 17 и 179 г/т, по данным [Kotov et al., 2023].

Наличие во вкрапленниках плагиоклаза, реже в пироксенах, существенно газовых флюидных включений свидетельствует о насыщенности расплавов флюидом. Эти включения сингенетичны расплавным и содержат при комнатной температуре низко-

концентрированный водный раствор и малоплотную газообразную CO₂, иногда с небольшой примесью H₂S. Такие включения подробно описаны в [Smirnov et al., 2019] и позволяют оценить давление в очаге при дегазации. Оно оказалось близко к 0.9 кбар, это означает, что дегазация в очаге кальдерного извержения происходила на глубине около 3 км.

Учитывая перечисленные выше данные, мы предполагаем, что генерация расплавов происходила в верхних горизонтах островодужной коры, а становление очагов кальдерообразующих извержений БКГ – непосредственно над областью магмогенерации. Вероятнее всего, на уровне становления очагов магмы были насыщены водой и углекислотой и содержали углекислотно-водный флюид.

НЕОПЛЕЙСТОЦЕН-ГОЛОЦЕННЫЙ КАЛЬДЕРНЫЙ ВУЛКАНИЗМ БКГ И ЕГО СОПОСТАВЛЕНИЕ С ПРОЦЕССАМИ КАЛЬДЕРООБРАЗОВАНИЯ В ДРУГИХ РЕГИОНАХ МИРА

Геологические обстановки эксплозивного кальдерообразования. Наиболее мощные эксплозивные кальдерообразующие извержения ближайшего геологического прошлого сосредоточены на активных континентальных окраинах (АКО) [Bachmann et al., 2002 (Fish Canyon); Anderson et al., 2000 (Bishop Tuff); de Silva, 1989 (Altiplano-Puna); и др.]. В меньшей степени это характерно и для вулканических островных дуг. При этом самые значительные по масштабам события происходили в пределах дуг, образованных на зрелой коре континентального типа (энсиалические дуги) [Hughes, Mahood, 2008]. В данной ситуации под «зрелой» континентальной корой мы понимаем земную кору, в строении которой, помимо осадков, участвуют комплексы пород высоких степеней регионального метаморфизма метабазитового и метапелитового составов и продукты корового интрузивного магматизма среднего и кислого составов [Витте, 1981]. В качестве примеров образования эксплозивных кальдер в вулканических дугах энсиалического типа можно привести извержение кальдеры Тоба на о. Суматра [Chesner, 2012] около 74 тыс. л. н., кальдеры Аира на о. Кюсю 22 тыс. л. н. [Aramaki, 1984] и кальдер в вулканической зоне Таупо в Новой Зеландии 26.5 тыс. л. н. [Wilson et al., 1984]. На территории России события сопоставимого масштаба имели место в плеистоцене–голоцене в Восточно-Камчатском вулканическом поясе и на Южной Камчатке [Volynets et al., 1999; Леонов, Гриб, 2004; Ponomareva et al., 2004; Леонов, Рогозин, 2007; и др.].

Вулканические дуги, развитые на коре океанического типа (энсиматические дуги), не обладают субстратами, благоприятными для образования больших объемов кислых магм. Тем не менее кальдеры, достигающие 5–10 км в диаметре, обнаружены как в

субаэральных, так и в подводных условиях многих энсиматических дуг [Leat, Larter, 2003; Stern, 2010]. Так, например, девять четвертичных кальдер выявлены вдоль энсиматической дуги Изу-Огасавара [Iizasa et al., 1999]. Признаки широко распространенного кальдерообразования имеются и в других подобных островных дугах. Примером является подводная кальдера Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай в островной дуге Тонга, где в январе 2022 г. произошло мощнейшее в XXI веке эксплозивное (некальдерообразующее) извержение (VEI ~ 6) [Poli, Shapiro, 2022]. Таким образом, кальдерный вулканализм достаточно широко распространен и на вулканических дугах, где отсутствует кора континентального типа.

Эксплозивный кальдерный вулканализм в плейстоцене–голоцене был характерен для всей БКГ. Провести сопоставление его распространения со строением земной коры сложно, так как недостаточно данных по глубинному геологическому строению и особенностям интрузивного магматизма этого региона. Судя по мощностям [Прошкина и др., 2017] и наличию интрузий кислого состава на уровне эрозионного среза, земная кора Северного и Южного секторов имеет признаки коры континентального типа. Это может объяснить обилие четвертичных эксплозивных кальдер в Южном секторе, но не согласуется с их существенно меньшим количеством в Северном секторе. В то же время значительное количество эксплозивных кальдер сосредоточено в Центральном секторе БКГ, где, предположительно, кора континентального типа отсутствует. Это ставит под сомнение непосредственную связь эксплозивного кальдерообразования в регионе с наличием в его строении коры континентального типа. Существует представление, что у энсиматических вулканических дуг формируется кора, которая по мере их развития изменяет свои характеристики от сходных с океанической к тем, которые характерны для континентальной, – земная кора островодужного типа [Stern, 2010]. Развитие кислого эксплозивного вулканализма может служить признаком зрелой островодужной коры БКГ, которая имеет состав и строение, переходное между корой океанического и континентального типов [Плечов, 2008].

Обращает на себя внимание то, что центры кальдерных извержений тяготеют к областям утолщения земной коры, приуроченным к восточной окраине Курильской глубоководной впадины. Это заставляет задуматься о связи неоплейстоценового кальдерообразования с развитием задугового бассейна. Считается, что оно прекратилось около 16–17 млн л. н. [Baranov et al., 2002]. Вместе с тем изучение геохимии магм и пространственного распределения вулканализма в сопоставлении с параметрами слэба в различных секторах БКГ дает основание полагать, что отголоски этих процессов продолжали оказывать влияние на вулканализм и кальдерообразование в юж-

ной части БКГ и на о. Хоккайдо даже в четвертичное время [Мартынов и др., 2015; Бергаль-Кувикас и др., 2024].

Развитие дакитового эксплозивного кальдерного вулканализма в конце неоплейстоцена и голоцене в Центральном секторе БКГ требует дальнейшего подробного изучения с учетом аномальности этой части дуги, где отмечается уменьшение мощности земной коры и развитие поперечных к простирианию дуги рифтоподобных структур в районе грабена пролива Буссоль. Учитывая геологическое строение и приуроченность к этой зоне землетрясений с высокой магнитудой на фоне более низкой сейсмической активности по сравнению с Северным и Южным секторами, здесь предполагают наличие мантийного диапира [Злобин и др., 2008; Бергаль-Кувикас и др., 2024]. Таким образом, в Центральном секторе БКГ могут развиваться обстановки растяжения, способствующие развитию эксплозивного кальдерного вулканализма, как это было показано в [Леонов, Гриб, 2004] для Восточно-Камчатского вулканического пояса.

Имеющиеся геохронологические данные и оценки показывают, что подавляющее большинство рассматриваемых в данной работе эксплозивных четвертичных кальдер БКГ возникло в позднем неоплейстоцене менее 50 тыс. л. н. Однако небольшое количество дат не позволяет утверждать, что именно на это время приходится пик эксплозивного кальдерообразования. Более древняя дата образования кальдеры Медвежьей говорит, что эти явления могли иметь место и в среднем неоплейстоцене, что подтверждается анализом рельефа кальдерных вулканов. Тем не менее весьма вероятно, что активное кальдерообразование БКГ могло происходить синхронно массовому образованию кальдер Восточно-Камчатского вулканического пояса и Южной Камчатки. Обращает на себя внимание также близость возрастов голоценового эксплозивного кальдерообразования Восточной и Южной Камчатки, кальдеры Тао-Русыр на о. Онекотан [Мелекесцев и др., 1998] и, возможно, одной из кальдер комплекса Заварицкого (Заварицкого IV) на о. Симушир. Они укладываются в диапазон 8–6 тыс. л. н.

Признаки позднеголоценовой и современной вулканической активности в центрах некоторых кальдерных извержений БКГ говорят о том, что их очаги продолжают свое существование и в настоящее время. Это в свою очередь требует особого внимания и организации постоянного комплексного мониторинга их активности с использованием современных геофизических, геохимических и спутниковых методов.

Состав, условия генерации магм и параметры становления магматических очагов. Результаты изучения параметров становления очагов кальдерных извержений южной части БКГ хорошо согласуются с данными для таких известных событий, как извержения вулканов Тоба (74 тыс. л. н.), Санторин (3600 л. н.), Катмай (1912 г.), Пинатубо (1991 г.) и не-

которых других. Образование их очагов также происходило в верхних частях земной коры на глубинах порядка 3–10 км в широком температурном диапазоне от 750 до 1000 °C [Hammer et al., 2002; Borisova et al., 2005; Chesner, Luhr, 2010; Cadoux et al., 2014; Geshi et al., 2020]. Для некоторых мощных кальдерообразующих извержений установлена важная роль внедрения в очаги кислой магмы более горячих базитовых или андезитовых магм [Sparks et al., 1977; Simon et al., 2014; и др.].

В настоящее время большой объем информации о глубинах локализации и геометрии магматических очагов получен методом локальной сейсмотомографии. Изучение подводящих магматических систем под вулканами, образование кальдер которых произошло в плейстоцене–голоцене в обстановках конвергентных границ литосферных плит, показывает, что их современные очаги расположены на глубинах 2–15 км [Huang et al., 2015; Huang et al., 2018; Kasatkina et al., 2022; Koulakov et al., 2023; Giacomuzzi et al., 2024; и др.].

Геометрия очагов и их небольшие размеры на сейсмотомограммах говорят о том, что в большинстве случаев это либо остаточные очаги, либо очаги посткальдерных стратовулканов. Магматические тела, которые по размерам сопоставимы с размерами кальдеры и могут спровоцировать кальдерообразование в будущем, тем не менее фиксируются под такими известными центрами, как Флегрейские поля в Италии и Йеллоустоун в США [Huang et al., 2015; Giacomuzzi et al., 2024].

Исследования флюидного режима перед кальдерообразующими извержениями показали, что порождающие их кислые магмы, действительно, обогащены водой. Их расплавы содержат от 2 до 8 мас. % H_2O , что наряду с перечисленными выше оценками глубины очага и давлений предполагает состояние, близкое к насыщению водным флюидом. Высокие содержания воды и признаки наличия флюидной фазы в магме кальдерообразующих извержений неоднократно устанавливались по включениям минералообразующих сред [Плечов и др., 2010; Borisova et al., 2014; Smirnov et al., 2019; и др.]. Малоглубинная (~ 3 км) дегазация магм может стать самостоятельным триггером кальдерного извержения. Выделяющийся в магме флюид значительно расширяется, создавая избыточное давление на кровлю очага. Это в свою очередь приводит к нарушению ее сплошности, инициирует лавинообразный процесс декомпрессионной дегазации, фрагментацию магмы и стремительное истечение из жерла и кольцевых трещин ее гигантских объемов в виде флюидизированной супензии магматического расплава, кристаллов и обломков вмещающих пород. Данные о флюидном режиме кальдерообразующих извержений БКГ могли бы стать научной основой для разработки методов прогноза подобного типа событий. Наши исследова-

ния близких по составу и параметрам становления очагов извержений кальдеры Львиная Пасть и пемзовой толщи перешейка Ветрового, расположенных на о. Итуруп, показывают, что они могли принципиально отличаться по поведению воды [Смирнов и др., 2017; Smirnov et al., 2019].

Образование кальдер в пределах конвергентных границ плит практически повсеместно связано с извержениями кислой магмы дацитового, риодацитового и риолитового состава [Бергаль-Кувикас и др., 2019]. Причем объемы извержений подтверждают то, что их очаги были по размерам сопоставимы с размерами гранитоидных батолитов [Annen, 2009].

В качестве ведущих механизмов образования кислых магм признается фракционирование более примитивных, часто основных, магм, в различной степени осложненное ассоциацией вмещающих пород [Gill, 1981; Volynets et al., 1999; Gertisser, Keller, 2000; и др.] и частичное плавление коровых пород [Beard, Lofgren, 1991; Atherton, Petford, 1993; Laube, Springer, 1998; Haraguchi et al., 2017; и др.]. Фракционирование основных и средних магм выглядит очень привлекательной моделью, так как основной объем продуктов извержений в вулканических поясах, развитых на конвергентных границах, имеет андезитовый и базальтовый состав. Однако известно, что появление кислых остаточных расплавов, типичных по составу для островодужных обстановок, требует 70–85 % кристаллизации исходной примитивной магмы [Kawamoto, 1996; Nandedkar et al., 2014]. Учитывая большие объемы кислого островодужного вулканизма, сложно объяснить их образование только лишь за счет фракционной кристаллизации, даже если она была осложнена контаминацией коровых пород.

В обстановках АКО, учитывая наличие в составе коры континентального типа метапелитовых метаморфических и ранее образованных интрузивных пород кислого и среднего состава, образование значительных объемов кислых выплавок путем частичного плавления не вызывает сомнений. В коре островных дуг, таких как БКГ, появление больших объемов кислых расплавов выглядит проблематично, так как она сложена породами, содержащими меньше кремнезема, глинозема, окислов калия и натрия.

Исследования минералогии, флюидных и расплавных включений пемз мощных извержений на островах Итуруп и Кунашир дают основание считать, что процесс магмогенерации включал дегидратационное плавление амфиболсодержащих метабазитовых субстратов в верхней части островодужной земной коры, приводящее к образованию плагиориолитового расплава и «габброноритового» рестита. Эволюция этой магмы включала последующую кристаллизацию из расплава нового плагиоклаза, к которому на поздних стадиях мог присоединиться кварц. Реализация сходных процессов, приведших к мощным кальдерообразующим эксплозиям на остро-

вах Итуруп и Кунашир Южного сектора БКГ означает, что они могут иметь универсальный характер для любых островодужных обстановок [Kotov et al., 2023].

Однако при частичном плавлении метабазитовых субстратов кислые расплавы отвечают не более 10–20 % плавления [Beard, Lofgren, 1991; Gao et al., 2016], и это требует существенной длительности формирования крупных очагов кислых магм. Термофизическое и термодинамическое моделирование показывает, что многократное интрудирование земной коры дайками основного состава может способствовать либо накоплению кислых фракций [Annen, Sparks, 2002], либо прогреву нижнекоровых пород [Petford, Gallagher, 2001], достаточных для образования больших объемов кислых расплавов за геологически разумные периоды времени. Временные рамки, определяющие становление очагов кальдерных вулканов БКГ, неизвестны. Опираясь на результаты теплофизического моделирования, можно ожидать, что для формирования корового очага, способного инициировать мощное эксплозивное извержение, необходимо 10^5 – 10^6 лет [Petford, Gallagher, 2001; Karakas, Dufek, 2015]. Как долго очаг, питавший кальдерообразующее извержение, может быть активным для БКГ также неизвестно. Однако недавние исследования в районе перешейка Ветровой показали, что очаг извержения, породившего пемзовую толщу в позднем неоплейстоцене, был активен примерно 2000 л. н. и произвел достаточно мощное извержение с VEI около 4–5 [Бергаль-Кувикас и др., 2023]. Эта находка ставит вопрос об учете возможных последствий таких извержений при оценке вулканической опасности, связанной с кальдерными вулканами в южной части БКГ. Более того, новые данные сейсмической томографии центральной части о. Итуруп свидетельствуют о наличии в этом районе на глубине около 5 км аномалии низких отношений v_s/v_p – вероятной зоны аккумуляции магмы и/или флюида, питавшей эксплозивные извержения в районе перешейка Ветрового [Koulakov et al., 2024].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный обзор показал, что в неоплейстоцене и голоцене кальдерообразование было характерно для всех секторов БКГ, но наиболее интенсивно оно проявилось на островах Южного и Центрального секторов в той части вулканической дуги, где она спрягается с задуговым бассейном Курильской глубоководной котловины. Причины более слабого развития эксплозивного кальдерного вулканизма на севере БКГ и особенно его отсутствие на втором по площади о. Парамушир требуют подробного изучения и уточнения.

Количество имеющихся датировок не позволяет построить сколько-нибудь полную картину динами-

ки кальдерообразования БКГ в четвертичный период. Имеющиеся данные тем не менее предполагают, что для четвертичного кальдерообразования в пределах БКГ возможны два этапа, сходные с проявлениями этого типа вулканизма в пределах Восточно-Камчатского вулканического пояса и Южной Камчатки: наиболее интенсивный, отвечающий концу неоплейстоцена (50–12 тыс. лет), и менее интенсивный в раннем голоцене (8–6 тыс. лет). Однако нельзя исключать, что мощные кальдерообразующие извержения происходили и в более раннее время, а также возможен более широкий временной диапазон проявления кальдерных событий на протяжении голоцена. Для уточнения хронологии кальдерного вулканизма требуется проведение комплексных палеовулканологических и геолого-вулканологических работ, включающих детальное изучение строения толщ проксимальной пирокластики кальдер, поиск и корреляция дистальных пеплов в почвенных разрезах на островах БКГ и в скважинах глубоководного бурения. Кальдерообразующие извержения, даже сравнительно небольших объемов, оказывают заметное воздействие на окружающую среду в региональном и глобальном масштабах: пирокластические потоки и плинианские пеплопады ближней зоны приводят к полной перестройке существующих экосистем, вызывая гибель флоры и фауны; вулканические пеплы и аэрозоли, поступающие в стратосферу, на протяжении нескольких лет оказывают влияние на климат, вызывая снижение среднегодовых температур (эффект вулканической зимы). Реконструкция особенностей воздействия кальдерных извержений БКГ на экосистемы могла бы позволить оценить последствия таких событий на современную среду обитания.

Полученные в последнее время данные по петрологии продуктов кальдерных извержений позволяют утверждать, что кальдерообразование БКГ в неоплейстоцене и голоцене было связано с развитием в верхних горизонтах земной коры (3–12 км) крупных очагов кислых магм преимущественно дакитового состава, близких по составу к интрузивным *M*-гранитам [White, 1979]. Их образование в значительной степени связано с частичным плавлением метабазитовых верхнекоровых субстратов при температурах, не превышающих 950 °С. Природа и масштабы процессов, приводящих к появлению кислых магм в верхах островодужной коры БКГ, недостаточно понятны и требуют большего объема исследований. Можно предположить, что это связано с длительным (до 1 млн лет) интрудированием коры глубинными высокотемпературными магмами. Пролить свет на особенности глубинных процессов, стимулирующих частичное плавление островодужной коры, может более детальное изучение особенностей посткальдерного вулканизма БКГ.

На сегодняшний день недостаточно информации о современном состоянии очагов, которые спрово-

цировали катастрофические кальдерообразующие извержения. Для ее получения необходимо развертывание программы сейсмического мониторинга кальдерных вулканов и построение сейсмотомографических моделей их подводящих систем. Это крайне важно для оценки рисков, связанных с их возможной активизацией.

Риолитовые расплавы дацитовых магм кальдерных извержений были насыщены H_2O , CO_2 , соединениями серы и, вероятно, другими газовыми компонентами, что привело к их дегазации на предэруптивных стадиях развития очагов. Имеющиеся данные позволяют считать, что эти процессы имели место на малых глубинах (~3 км). Однако данных о флюидном режиме эволюции очагов кальдерообразующих извержений еще крайне мало, чтобы судить о том, как летучие компоненты влияли на весь процесс подготовки катастрофических эксплозий. Дегазация на ранних стадиях эволюции таких очагов могла послужить самостоятельным триггером мощного эксплозивного извержения с образованием кальдеры. Также нет полной определенности в понимании источников летучих компонентов: являются они продуктами дегидратационного плавления или имеют отношение к дегазации глубинных магм. Все это требует более детальных исследований в области петрологии магм и флюидного режима очагов кальдерных извержений.

БЛАГОДАРНОСТИ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Оригинальные данные по валовым составам пород, составам стекла основной массы и расплавных включений получены в лабораториях ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН. Часть авторского материала была собрана благодаря поддержке Курильского государственного природного заповедника (г. Южно-Курильск, Сахалинская обл.). Авторы выражают глубокую признательность рецензентам д.г.-м.н. П.Ю. Плечову (Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, г. Москва) и д.г.-м.н. А.Б. Перепелову (ИГХ СО РАН, г. Иркутск) за ценные комментарии и предложения, побудившие авторов к пересмотру некоторых формулировок и улучшению аргументации.

Работа посвящается памяти выдающихся исследователей вулканизма Курильских островов: д.г.-м.н. Ю.А. Мартынова и к.г.-м.н. А.В. Рыбина.

Работа выполнена в рамках планов НИР по госзаказам Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск), Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский) и Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск).

Дополнительные материалы: <https://elibrary.ru/item.asp?id=79703238>.

ЛИТЕРАТУРА

- Авдейко Г.П., Антонов А.Ю., Волынец О.Н., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Гладков Н.Г., Цветков А.А., Марков И.А., Палуева А.А. (1992). Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги. М., Наука, 528 с.
- Базанова Л.И., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Дирксен О.В., Дирксен В.Г. (2016). Вулканические катастрофы позднего плейстоцена–голоцен на Камчатке и Курильских островах. Часть 1. Типы и классы катастрофических извержений – главных компонентов вулканического катастрофизма // Вулканология и сейсмология, № 3, с. 3–21.
- Бергаль-Кувикас О.В. (2015). Объемы четвертичных вулканитов Курильской островной дуги: анализ пространственного расположения и связь с зоной субдукции // Тихоокеанская геология, т. 34, № 2, с. 103–116.
- Бергаль-Кувикас О.В., Рогозин А.В., Кляпицкий Е.С. (2019). Использование сравнительного анализа распространения и происхождения кальдер с базальт-андезитовым составом магм для изучения генезиса миоценовых игнимбритов Восточного вулканического пояса Камчатки // Геодинамика и тектонофизика, т. 10, № 3, с. 815–828.
- Бергаль-Кувикас О.В., Смирнов С.З., Агатова А.Р., Дегтерев А.В., Разжигаева Н.Г., Пинегина Т.К., Портнягин М.В., Карманов Н.С., Тимина Т.Ю. (2023). Голоценовое эксплозивное извержение на перешейке Ветровой (о. Итуруп) как источник маркирующего горизонта тефры (~2000 лет назад) в центральной части Курильской островной дуги // Докл. РАН. Науки о Земле, т. 511, № 1, с. 46–54.
- Бергаль-Кувикас О.В., Гордеев Е.И., Кулаков И.Ю. (2024). Роль задугового бассейна в формировании гетерогенности слэба и происхождении вулканизма Курило-Камчатской островной дуги // Докл. РАН. Науки о Земле, т. 516, № 2, с. 600–605.
- Бондаренко В.И. (1991). Сейсмоакустические исследования кальдеры Львиная Пасть // Вулканология и сейсмология, № 4, с. 44–53.
- Булгаков Р.Ф. (2018). Опыт применения метода термолюминесцентного датирования к пирокластическим отложениям Курильских островов // Геосистемы переходных зон, т. 2, № 4, с. 392–397.
- Витте Л.В. (1981). Типы континентальной земной коры и история их развития. Новосибирск, Наука, 209 с.
- Горшков Г.С. (1958). Действующие вулканы Курильской островной дуги // Молодой вулканализм СССР. Труды Лаборатории вулканологии АН СССР, вып. 13, с. 5–70.
- Горшков Г.С. (1960). Кальдера Заваринского // Бюллетень вулканологических станций, № 30, с. 30–49.
- Горшков Г.С. (1961). Спекшийся туф кальдеры Заваринского (о. Симушир, Курильские острова) // Труды Лаборатории вулканологии АН СССР, вып. 20, с. 102–107.
- Горшков Г.С. (1967). Вулканализм Курильской островной дуги. М., Наука, 288 с.
- Дегтерев А.В., Рыбин А.В., Мелекесцев И.В., Разжигаева Н.Г. (2012). Эксплозивные извержения вулкана Пик Сарычева в голоцене (о. Матуя, Центральные Курилы): геохимия тефры // Тихоокеанская геология, т. 31, № 6, с. 16–26.
- Дегтерев А.В., Рыбин А.В., Арсланов Х.А., Коротеев И.Г., Гурьянов В.Б., Козлов Д.Н., Чибисова М.В. (2015). Катастрофические эксплозивные извержения Львиной Пасти (о. Итуруп): стратиграфия и геохронология // Всероссийская научная конференция с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтеюгорска» (Южно-Сахалинск, 26–30 мая 2015 г.) / Под ред. Б.В. Левина, О.Н. Лихачевой, Владивосток, Дальнаука, т. 2, с. 210–214.

- Деркачев А.Н., Портнягин М.В. (2013).** Маркирующие про- слой тефры катастрофических извержений кальдерного комплекса Немо (о. Онекотан, Курильские острова) в поздне-четвертичных отложениях Охотского моря // Стратиграфия. Геологическая корреляция, т. 21, № 5, с. 94–112.
- Дирксен О.В., Рыбин А.В. (2018).** Эксплозивные извержения кальдеры Заваринского – возможный источник пеплов в морских колонках Северо-Западной Пацифики // «Вулканализм и связанные с ним процессы». Материалы XXI региональной научной конференции, посвященной Дню вулканолога (Петропавловск-Камчатский, 29–30 марта 2018 г.). Петропавловск-Камчатский, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, с. 40–43.
- Дирксен О.В., Рыбин А.В. (2020).** Раннеголоценовые тефры кальдеры Заваринского (о. Симушир) – новые пеплы-маркеры СЗ Пацифики // «Вулканализм и связанные с ним процессы». Материалы XXIII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога (Петропавловск-Камчатский, 30 марта–01 апреля 2020 г.). Петропавловск-Камчатский, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, с. 18–21.
- Ермаков В.А., Семакин В.П. (1996).** Геология кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Курильские острова) // ДАН, т. 351, № 3, с. 361–365.
- Ермаков В.А., Штейнберг Г.С. (1999).** Вулкан Кудрявый и эволюция кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Курильские острова) // Вулканология и сейсмология, № 3, с. 19–40.
- Злобин Т.К., Левин Б.В., Полец А.Ю. (2008).** Первые резуль-таты сопоставления катастрофических Симуширских зем-летрясений 15 ноября 2006 г. ($M = 8.3$) и 13 января 2007 г. ($M = 8.1$) и глубинного строения земной коры Центральных Курил // ДАН, т. 420, № 1, с. 111–115.
- Ковтунович П.Ю., Сафонов А.Д., Удодов В.В., Расщепкина Е.В., Руденко Е.А. (2002).** Государственная геологическая карта Российской Федерации м-ба 1: 200 000. Издание второе. Серия Курильская. Объяснительная записка. СПб, Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 269 с.
- Корсунская Г.В. (1956).** Вулканы острова Симушир // Бюлле-тень вулканологических станций, № 24, с. 61–65.
- Котов А.А., Смирнов С.З., Плечов П.Ю., Персиков Э.С., Черткова Н.В., Максимович И.А., Карманов Н.С., Бухти-яров П.Г. (2021).** Методика определения содержания воды в природных расплавах риолитового состава методами спек-троскопии комбинационного рассеяния и электронно-зондо-вого микронализации // Петрология, т. 29, № 4, с. 429–448.
- Кузьмин Д.В., Низаметдинов И.Р., Смирнов С.З., Тимина Т.Ю., Шевко А.Я., Гора М.П., Рыбин А.В. (2023).** Магнези-альные базальты кальдеры Медвежья: основные магмы и их источники на примере вулкана Меньший Брат (о. Итуруп) // Петрология, т. 31, № 3, с. 238–262.
- Леонов В.Л., Гриб Е.Н. (2004).** Структурные позиции и вулка-низм четвертичных кальдер Камчатки. Владивосток, Дальна-ука, 189 с.
- Леонов В.Л., Рогозин А.В. (2007).** Карымшина – гигантская кальдера-супервулкан на Камчатке: границы, строение, объем пирокластики // Вулканология и сейсмология, № 5, с. 14–28.
- Лучицкий И.В. (1971).** Основы палеовулканологии. Современ-ные вулканы. Т. 1. М., Наука, 479 с.
- Мартынов А.Ю., Мартынов Ю.А. (2017).** Плейстоценовый базальтовый вулканализм о. Кунашир (Курильская островная дуга): минералогия, геохимия, результаты компьютерного моделирования // Петрология, т. 25, № 2, с. 194–214.
- Мартынов А.Ю., Мартынов Ю.А., Рыбин А.В., Кимура Дж.-И. (2015).** Роль задутовых процессов в происхождении субдукционных магм: новые данные по изотопии Sr, Nd и Pb в вулканитах ранних этапов формирования о. Кунашир (Курильская островная дуга) // Геология и геофизика, т. 56, № 3, с. 469–487, DOI: 10.15372/GiG20150301, EDN: 23205343.
- Мархинин Е.К. (1959).** Вулканы острова Кунашир // Труды Лаборатории вулканологии АН СССР, вып. 17, с. 64–155.
- Мелекесцев И.В., Егорова И.А., Лукинина Е.Г. (1974).** Внут-ренний хребет Курильской дуги // Камчатка, Курильские и Командорские острова (История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока) / Ред. И.В. Лучицкий. М., Наука, с. 265–327.
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Сулержицкий Л.Д. (1988).** Катастрофические эксплозивные извержения вулканов Курило-Камчатской области в конце плейстоцена – начале голоце-на // Докл. АН СССР, т. 300, № 1, с. 175–180.
- Мелекесцев И.В., Волынец О.Н., Антонов А.Ю. (1997).** Каль-дера Немо III (о-в Онекотан, Северные Курилы): строение, ^{14}C -возраст, динамика кальдерообразующего извержения, эволюция ювенильных продуктов // Вулканология и сейсмо-логия, № 1, с. 32–51.
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Сулер-жицкий Л.Д. (1998).** «Век» вулканических катастроф в раннем голоцене Курило-Камчатской области // Глобаль-ные изменения природной среды / Под ред. Н.Л. Добрецова, В.И. Коваленко. Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГМ СО РАН, с. 146–152.
- Новейший и современный вулканализм на территории России (2005).** Отв. ред. Н.П. Лаверов. М., Наука, 604 с.
- Остапенко В.Ф. (1970).** Морфология и строение кальдерного вулкана Медвежий (о. Итуруп, Курильские острова) // Изве-стия Сахалинского отдела Географического общества СССР. Южно-Сахалинск, вып. 1, с. 99–108.
- Петрографический кодекс России.** Магматические, мета-морфические, метасоматические, импактные образования. (2008). Изд. второе. СПб, Изд-во ВСЕГЕИ, 203 с.
- Плечов П.Ю. (2008).** Множественность источников острово-дужных магм: Автореф. дис. д.г.-м.н. М., МГУ, 45 с.
- Плечов П.Ю., Балашова А.Л., Дирксен О.В. (2010).** Дегазация магмы кальдерообразующего извержения Курильского озера 7600 лет назад и ее влияние на климат // ДАН, т. 433, № 3, с. 386–389.
- Прошкина З.Н., Кулинич Р.Г., Валитов М.Г. (2017).** Структу-ра, вещественный состав и глубинное строение океанского склона Центральных Курил: новые детали // Тихоокеанская геология, т. 36, № 6, с. 58–69.
- Рыбин А.В., Разжигаева Н.Г., Гурьянов В.Б., Дегтерев А.В., Чибисова М.В.** Основные этапы формирования вулкана Тятя (о. Кунашир, Курильские острова) // Всероссийская научная конференция с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска» (Южно-Сахалинск, 26–30 мая 2015 г.) / Под ред. Б.В. Левина, О.Н. Лихачевой. Владивосток, Дальнаука, т. 2, с. 271–273.
- Рыбин А.В., Дегтерев А.В., Дудченко И.П., Гурьянов В.Б., Романюк Ф.А., Климанцов И.М. (2017).** Комплексные ис-следования на острове Матуя в 2017 году // Геосистемы пере-ходных зон, т. 1, № 4, с. 21–29.
- Смирнов С.З., Рыбин А.В., Соколова Е.Н., Кузьмин Д.В., Дег-терев А.В., Тимина Т.Ю. (2017).** Кислые магмы кальдерных извержений острова Итуруп: первые результаты исследова-ния расплавных включений во вкраепленниках пемз кальдеры Львиная пасть и перешейка Ветровой // Тихоокеанская гео-логия, т. 36, № 1, с. 50–69.
- Федорченко В.И., Абдурахманов А.И., Родионова Р.И. (1989).** Вулканализм Курильской островной дуги: геология и петроге-незис / Ред. Ю.А. Косыгин. М., Наука, 237 с.
- Эрлих Э.Н., Мелекесцев И.В. (1973).** Четвертичный вулканализм западной части Тихоокеанского кольца // Кислый вулканализм / Ред. К.Н. Рудич. Новосибирск, Наука, с. 4–39.
- Afanasiev V.V., Dunaev N.N., Gorbunov A.O., Uba A.V. (2020).** The manifestation of caldera-forming volcanism in the forma-

- tion of the coast (on example of Iturup Island of the Great Kuril Ridge), in: Chaplina, T.O. (Ed.), *Processes in GeoMedia – Volume I. Springer Geology*, p. 51–61.
- Anderson A.T., Davis A.M., Lu F. (2000).** Evolution of Bishop Tuff rhyolitic magma based on melt and magnetite inclusions and zoned phenocrysts // *J. Petrol.*, v. 41 (3), p. 449–473, DOI: [10.1093/petrology/41.3.449](https://doi.org/10.1093/petrology/41.3.449).
- Annen C. (2009).** From plutons to magma chambers: Thermal constraints on the accumulation of eruptible silicic magma in the upper crust // *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 284 (3–4), p. 409–416, DOI: [10.1016/j.epsl.2009.05.006](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.05.006).
- Annen C., Sparks R.S.J. (2002).** Effects of repetitive emplacement of basaltic intrusions on thermal evolution and melt generation in the crust // *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 203 (3–4), p. 937–955, DOI: [10.1016/S0012-821X\(02\)00929-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00929-9).
- Aramaki S. (1984).** Formation of the Aira Caldera, southern Kyushu, 22,000 years ago // *J. Geophys. Res. B: Solid Earth*, v. 89 (10), p. 8485–8501, DOI: [10.1029/JB089iB10p08485](https://doi.org/10.1029/JB089iB10p08485).
- Atherton M.P., Petford N. (1993).** Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust // *Nature*, v. 362 (6416), p. 144–146, DOI: [10.1038/362144a0](https://doi.org/10.1038/362144a0).
- Bachmann O., Bergantz G. (2008).** The magma reservoirs that feed supereruptions // *Elements*, v. 4 (1), p. 17–21, DOI: [10.2113/GSELEMENTS.4.1.17](https://doi.org/10.2113/GSELEMENTS.4.1.17).
- Bachmann O., Dungan M., Lipman P.W. (2002).** The Fish Canyon magma body, San Juan volcanic field, Colorado: rejuvenation and eruption of an upper-crustal batholith // *J. Petrol.*, v. 43 (8), p. 1469–1503, DOI: [10.1093/petrology/43.8.1469](https://doi.org/10.1093/petrology/43.8.1469).
- Baranov B., Wong H.K., Dozorova K., Karp B., Lüdmann T., Karnaugh V. (2002).** Opening geometry of the Kurile Basin (Okhotsk Sea) as inferred from structural data // *Island Arc*, v. 11 (3), p. 206–219, DOI: [10.1046/j.1440-1738.2002.00366.x](https://doi.org/10.1046/j.1440-1738.2002.00366.x).
- Barker F. (1979).** Trondhjemite: definition, environment and hypotheses of origin, in: Trondhjemites, Dacites, and Related Rocks. Elsevier, New York, *Developments in Petrology*, v. 6, p. 1–12, DOI: [10.1016/B978-0-444-41765-7.50006-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-41765-7.50006-X).
- Beard J.S., Lofgren G.E. (1991).** Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3, and 6.9 kb // *J. Petrol.*, v. 32 (2), p. 365–401, DOI: [10.1093/petrology/32.2.365](https://doi.org/10.1093/petrology/32.2.365).
- Borisova A.Yu., Pichavant M., Beny J.-M., Rouer O., Pronost J. (2005).** Constraints on dacite magma degassing and regime of the June 15, 1991, climactic eruption of Mount Pinatubo (Philippines): New data on melt and crystal inclusions in quartz // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, v. 145 (1–2), p. 35–67, DOI: [10.1016/j.jvolgeores.2005.01.004](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.01.004).
- Borisova A.Yu., Toutain J.-P., Dubessy J., Pallister J., Zwick A., Salvi S. (2014).** H_2O-CO_2-S fluid triggering the 1991 Mount Pinatubo climactic eruption (Philippines) // *Bull. Volcanol.*, v. 76, p. 800, DOI: [10.1007/s00445-014-0800-3](https://doi.org/10.1007/s00445-014-0800-3).
- Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V., Sulerzhitsky L.D. (1995).** Ages of calderas, large explosive craters and active volcanoes in the Kuril-Kamchatka region, Russia // *Bull. Volcanol.*, v. 57 (6), p. 383–402, DOI: [10.1007/BF00300984](https://doi.org/10.1007/BF00300984).
- Bronk Ramsey C. (1995).** Radiocarbon calibration and analysis of stratigraphy: The OxCal program // *Radiocarbon*, v. 37 (2), p. 425–430, DOI: [10.1017/S0033822200030903](https://doi.org/10.1017/S0033822200030903).
- Cadoux A., Scaillet B., Druitt T.H., Deloule E. (2014).** Magma storage conditions of large Plinian eruptions of Santorini volcano (Greece) // *J. Petrol.*, v. 55 (6), p. 1129–1171, DOI: [10.1093/petrology/egu021](https://doi.org/10.1093/petrology/egu021).
- Chesner C.A. (2012).** The Toba Caldera complex // *Quat. Int.*, v. 258, p. 5–18, DOI: [10.1016/j.quaint.2011.09.025](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.09.025).
- Chesner C.A., Luhr J.F. (2010).** A melt inclusion study of the Toba Tuffs, Sumatra, Indonesia // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, v. 197 (1–4), p. 259–278, DOI: [10.1016/j.jvolgeores.2010.06.001](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.06.001).
- Cole J.W., Milner D.M., Spinks K.D. (2005).** Calderas and caldera structures: a review // *Earth Sci. Rev.*, v. 69 (1–2), p. 1–26, DOI: [10.1016/j.earscirev.2004.06.004](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.06.004).
- Derkachev A.N., Nikolaeva N.A., Gorbarenko S.A., Portnyagin M.V., Ponomareva V.V., Nürnberg D., Sakamoto T., Iijima K., Liu Y., Shi X., Lv H., Wang K. (2016).** Tephra layers in the Quaternary deposits of the Sea of Okhotsk: Distribution, composition, age and volcanic sources // *Quat. Int.*, v. 425, p. 248–272, DOI: [10.1016/j.quaint.2016.07.004](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.07.004).
- de Silva S.L. (1989).** Altiplano-Puna volcanic complex of the central Andes // *Geology*, v. 17 (12), p. 1102–1106, DOI: [10.1130/0091-7613\(1989\)017<1102:APVCOT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1989)017<1102:APVCOT>2.3.CO;2).
- Erlich E. (1986).** Geology of the Calderas of Kamchatka and Kurile Islands with Comparison to Calderas of Japan and the Aleutians, Alaska. U.S. Geological Survey, Open-File Report 86-291, DOI: [10.3133/ofr86291](https://doi.org/10.3133/ofr86291).
- Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. (2001).** A geochemical classification for granitic rocks // *J. Petrol.*, v. 42 (11), p. 2033–2048, DOI: [10.1093/petrology/42.11.2033](https://doi.org/10.1093/petrology/42.11.2033).
- Gao P., Zheng Y.-F., Zhao Z.-F. (2016).** Experimental melts from crustal rocks: A lithochemical constraint on granite petrogenesis // *Lithos*, v. 266–267, p. 133–157, DOI: [10.1016/j.lithos.2016.10.005](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.10.005).
- Gertisser R., Keller J. (2000).** From basalt to dacite: origin and evolution of the calc-alkaline series of Salina, Aeolian Arc, Italy // *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 139 (5), p. 607–626, DOI: [10.1007/s004100000159](https://doi.org/10.1007/s004100000159).
- Geshi N., Yamada I., Matsumoto K., Nishihara A., Miyagi I. (2020).** Accumulation of rhyolite magma and triggers for a caldera-forming eruption of the Aira Caldera, Japan // *Bull. Volcanol.*, v. 82 (6), 44, DOI: [10.1007/s00445-020-01384-6](https://doi.org/10.1007/s00445-020-01384-6).
- Giacomuzzi G., Chiarabba C., Bianco F., De Gori P., Agostinetti N.P. (2024).** Tracking transient changes in the plumbing system at Campi Flegrei Caldera // *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 637, p. 118744, DOI: [10.1016/j.epsl.2024.118744](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2024.118744).
- Gill J.B. (1981).** Orogenic Andesites and Plate Tectonics. Springer, Berlin, 390 p.
- Giordano G., Cas R.A.F. (2021).** Classification of ignimbrites and their eruptions // *Earth Sci. Rev.*, v. 220, 103697, DOI: [10.1016/j.earscirev.2021.103697](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103697).
- Hammer J.E., Rutherford M.J., Hildreth W. (2002).** Magma storage prior to the 1912 eruption at Novarupta, Alaska // *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 144 (2), p. 144–162, DOI: [10.1007/s00410-002-0393-2](https://doi.org/10.1007/s00410-002-0393-2).
- Haraguchi S., Kimura J.-I., Senda R., Fujinaga K., Nakamura K., Takaya Y., Ishii T. (2017).** Origin of felsic volcanism in the Izu arc intra-arc rift // *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 172 (5), 25, DOI: [10.1007/s00410-017-1345-1](https://doi.org/10.1007/s00410-017-1345-1).
- Huang H.-H., Lin F.-C., Schmandt B., Farrell J., Smith R.B., Tsai V.C. (2015).** The Yellowstone magmatic system from the mantle plume to the upper crust // *Science*, v. 348 (6236), p. 773–776, DOI: [10.1126/science.aaa5648](https://doi.org/10.1126/science.aaa5648).
- Huang Y.-C., Ohkura T., Kagiya T., Yoshikawa S., Inoue H. (2018).** Shallow volcanic reservoirs and pathways beneath Aso caldera revealed using ambient seismic noise tomography // *Earth Planets Space*, v. 70 (1), 169, DOI: [10.1186/s40623-018-0941-2](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0941-2).
- Hughes G.R., Mahood G.A. (2008).** Tectonic controls on the nature of large silicic calderas in volcanic arcs // *Geology*, v. 36 (8), p. 627–630, DOI: [10.1130/G24796A.1](https://doi.org/10.1130/G24796A.1).
- Iizasa K., Fiske R.S., Ishizuka O., Yuasa M., Hashimoto J., Ishibashi J., Naka J., Horii Y., Fujiwara Y., Imai A., Koyama S. (1999).** A Kuroko-type polymetallic sulfide deposit in a submarine silicic caldera // *Science*, v. 283 (5404), p. 975–977, DOI: [10.1126/science.283.5404.975](https://doi.org/10.1126/science.283.5404.975).
- Karakas O., Dufek J. (2015).** Melt evolution and residence in extending crust: Thermal modeling of the crust and crustal magmas

- // *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 425, p. 131–144, DOI: [10.1016/j.epsl.2015.06.001](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.06.001).
- Kasatkina E., Koulakov I., Grapenthin R., Izbekov P., Larsen J.F., Al Arifi N., Qaysi S.I. (2022).** Multiple magma sources beneath the Okmok caldera as inferred from local earthquake tomography // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, v. 127 (10), e2022JB024656, DOI: [10.1029/2022JB024656](https://doi.org/10.1029/2022JB024656).
- Kawamoto T. (1996).** Experimental constraints on differentiation and H_2O abundance of calc-alkaline magmas // *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 144 (3–4), p. 577–589, DOI: [10.1016/S0012-821X\(96\)00182-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(96)00182-3).
- Kotov A., Smirnov S., Nizametdinov I., Uno M., Tsuchiya N., Maksimovich I. (2023).** Partial melting under shallow-crustal conditions: A study of the Pleistocene caldera eruption of Mendeleev Volcano, Southern Kuril Island Arc // *J. Petrol.*, v. 64 (6), egad033, DOI: [10.1093/petrology/egad033](https://doi.org/10.1093/petrology/egad033).
- Koulakov I., Izbekov P., Eichelberger J., Al Arifi N., Qaysi S.I. (2023).** Interconnection of magma sources beneath the Katmai volcanic system inferred from seismic tomography and petrology // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, v. 434, 107744, DOI: [10.1016/j.jvolgeores.2023.107744](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107744).
- Koulakov I., Gordeev E.I., Abkadyrov I., Bergal-Kuvikas O., Chebrov D. (2024).** Feeding system beneath active volcanoes in central part of Iturup Island (Kuril Arc) inferred from local earthquake tomography // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, v. 456 (1), 108233, DOI: [10.1016/j.jvolgeores.2024.108233](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2024.108233).
- Laube N., Springer J. (1998).** Crustal melting by ponding of mafic magmas: A numerical model // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, v. 81 (1–2), p. 19–35, DOI: [10.1016/S0377-0273\(97\)00072-3](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(97)00072-3).
- Leat P.T., Larter R.D. (2003).** Intra-oceanic subduction systems: introduction // *Geol. Soc., London, Spec. Publ.*, v. 219 (1), p. 1–17, DOI: [10.1144/GSL.SP.2003.219.01.01](https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.219.01.01).
- Marynov Yu., Rybin A., Chibisova M., Ostapenko D., Davydova M. (2023).** Basaltic volcanism of Medvezhia caldera on the Iturup Island of Kurile Isles: impact of regional tectonics on subduction magmatism // *Int. Geol. Rev.*, v. 65 (2), p. 179–199, DOI: [10.1080/00206814.2022.2039885](https://doi.org/10.1080/00206814.2022.2039885).
- Milne J. (1879).** I. – A cruise among the volcanoes of the Kurile Islands // *Geol. Mag.*, v. 6 (8), p. 337–348, DOI: [10.1017/S0016756800157620](https://doi.org/10.1017/S0016756800157620).
- Nakagawa M., Ishizuka Y., Hasegawa T., Baba A., Kosugi A. (2008).** Preliminary Report on Volcanological Research of KBP 2007–08 Cruise by Japanese Volcanology Group. Hokkaido University, Sapporo.
- Nandedkar R.H., Ulmer P., Müntener O. (2014).** Fractional crystallization of primitive, hydrous arc magmas: an experimental study at 0.7 GPa // *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 167 (6), 1015, DOI: [10.1007/s00410-014-1015-5](https://doi.org/10.1007/s00410-014-1015-5).
- Newhall C.G., Dzurisin D. (1988).** Historical Unrest at Large Calderas of the World. *Bulletin* 1855, v. 1–2, 1108 p., DOI: [10.3133/b1855](https://doi.org/10.3133/b1855).
- Ostapenko V.F., Fedorchenco V.I., Shilov V.N. (1967).** Pumices, ignimbrites and rhyolites from the Great Kurile Arc // *Bull. Volcanol.*, v. 30 (1), p. 81–92, DOI: [10.1007/BF02597658](https://doi.org/10.1007/BF02597658).
- Petford N., Gallagher K. (2001).** Partial melting of mafic (amphibolitic) lower crust by periodic influx of basaltic magma // *Earth. Planet. Sci. Lett.*, v. 193 (3–4), p. 483–499, DOI: [10.1016/S0012-821X\(01\)00481-2](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00481-2).
- Poli P., Shapiro N.M. (2022).** Rapid characterization of large volcanic eruptions: measuring the impulse of the Hunga Tonga Ha'apai explosion from teleseismic waves // *Geophys. Res. Lett.*, v. 49 (8), e2022GL098123, DOI: [10.1029/2022GL098123](https://doi.org/10.1029/2022GL098123).
- Ponomareva V.V., Kyle P.R., Melekestsev I.V., Rinkleff P.G., Dirksen O.V., Sulerzhitsky L.D., Zaretskaia N.E., Rourke R. (2004).** The 7600 (^{14}C) year BP Kurile Lake caldera-forming eruption, Kamchatka, Russia: stratigraphy and field relationships // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, v. 136 (3–4), p. 199–222, DOI: [10.1016/j.jvolgeores.2004.05.013](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.05.013).
- Ponomareva V., Portnyagin M., Davies S.M. (2015).** Tephra without borders: Far-reaching clues into past explosive eruptions // *Front. Earth Sci.*, v. 3, p. 83, DOI: [10.3389/feart.2015.00083](https://doi.org/10.3389/feart.2015.00083).
- Ponomareva V.V., Portnyagin M.V., Bubenshchikova N.V., Zelenin E.A., Derkachev A.N., Jicha B., Gorbarenko S.A., Cook E., Garbe-Schönberg D., Hoernle K. (2023).** A 6.2 Ma-long record of major explosive eruptions from the NW Pacific volcanic arcs based on the offshore tephra sequences on the northern tip of the Emperor Seamount Chain // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, v. 24 (12), e2023GC011126, DOI: [10.1029/2023GC011126](https://doi.org/10.1029/2023GC011126).
- Razzhigaeva N.G., Matsumoto A., Nakagawa M. (2016).** Age, source, and distribution of Holocene tephra in the southern Kurile Islands: Evaluation of Holocene eruptive activities in the southern Kurile arc // *Quat. Int.*, v. 397, p. 63–78, DOI: [10.1016/j.quaint.2015.07.070](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.07.070).
- Rickwood P.C. (1989).** Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements // *Lithos*, v. 22 (4), p. 247–263, DOI: [10.1016/0024-4937\(89\)90028-5](https://doi.org/10.1016/0024-4937(89)90028-5).
- Shand S.J. (1943).** Eruptive Rocks: Their Genesis, Composition, Classification, and Their Relation to Ore-Deposits; with a Chapter on Meteorites. Wiley, New York, 444 p.
- Simon J.I., Weis D., DePaolo D.J., Renne P.R., Mundil R., Schmitt A.K. (2014).** Assimilation of preexisting Pleistocene intrusions at Long Valley by periodic magma recharge accelerates rhyolite generation: rethinking the remelting model // *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 167 (1), 955, DOI: [10.1007/s00410-013-0955-5](https://doi.org/10.1007/s00410-013-0955-5).
- Smirnov S.Z., Rybin A.V., Kruk N.N., Timina T.Yu., Sokolova E.N., Kuzmin D.V., Maksimovich I.A., Kotov A.A., Shevko A.Ya., Nizametdinov I.R., Abersteiner A. (2019).** Parental melts and magma storage of a large-volume dacite eruption at Vetrovoy Isthmus (Iturup Island, Southern Kuril Islands): Insights into the genesis of subduction-zone dacites // *J. Petrol.*, v. 60 (7), p. 1349–1370, DOI: [10.1093/petrology/egz032](https://doi.org/10.1093/petrology/egz032).
- Sparks R.S.J., Self S., Walker G.P.L. (1973).** Products of ignimbrite eruptions // *Geology*, v. 1 (3), p. 115–118, DOI: [10.1130/0091-7613\(1973\)1<115:POIE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1973)1<115:POIE>2.0.CO;2).
- Sparks S.R.J., Sigurdsson H., Wilson L. (1977).** Magma mixing: a mechanism for triggering acid explosive eruptions // *Nature*, v. 267 (5609), p. 315–318, DOI: [10.1038/267315a0](https://doi.org/10.1038/267315a0).
- Stern R.J. (2010).** The anatomy and ontogeny of modern intra-oceanic arc systems // *Geol. Soc., London, Spec. Publ.*, v. 338 (1), p. 7–34, DOI: [10.1144/SP338.2](https://doi.org/10.1144/SP338.2).
- Volynets O.N., Ponomareva V.V., Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Chen Ch.H. (1999).** Holocene eruptive history of Ksudach volcanic massif, South Kamchatka: evolution of a large magmatic chamber // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, v. 91 (1), p. 23–42, DOI: [10.1016/S0377-0273\(99\)00049-9](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(99)00049-9).
- White A.J.R. (1979).** Sources of granite magmas // *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 11 (7), p. 539.
- Williams H. (1941).** Calderas and Their Origin. University of California Press, 108 p.
- Wilson C.J.N., Rogan A.M., Smith I.E.M., Northey D.J., Nairn I.A., Houghton B.F. (1984).** Caldera volcanoes of the Taupo Volcanic Zone, New Zealand // *J. Geophys. Res. B: Solid Earth*, v. 89 (10), p. 8463–8484, DOI: [10.1029/JB089iB10p08463](https://doi.org/10.1029/JB089iB10p08463).