

УДК 552.11

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО СОСТАВУ ПОРОД И МИНЕРАЛОВ ВУЛКАНОВ ХАРЧИНСКИЙ И ЗАРЕЧНЫЙ (ЦЕНТРАЛЬНАЯ КАМЧАТСКАЯ ДЕПРЕССИЯ): ГЕТЕРОГЕННОСТЬ МАНТИЙНОГО ИСТОЧНИКА И ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ МАГМ В КОРОВЫХ УСЛОВИЯХ¹

© 2023 г. Н. В. Горбач^a, Н. А. Некрылов^{a, b}, М. В. Портнягин^c, К. Хернле^{c, d}

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

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

^cGEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, Kiel, Germany

^dInstitute of Geosciences, Kiel University, Kiel, Germany

*e-mail: n_gorbach@mail.ru

Поступила в редакцию 11.10.2022 г.

После доработки 11.11.2022 г.

Принята к публикации 18.11.2022 г.

Вулканы Харчинский, Заречный и зона моногенных конусов Харчинского озера – уникальные центры излияния магнезиальных лав в области субдукции северного края Тихоокеанской плиты под Камчатку. В статье приведены новые геохимические данные по составу пород (55 образцов) и минералов (более 900 анализов оливина, пироксенов, амфибола и плагиоклаза) этих центров, проанализированных методами РФА и LA-ICP-MS (породы) и электронного микрозонда (минералы). Большая часть изученных пород представлена магнезиальными ($Mg\# = 60–75$ мол. %) умеренно-калиевыми базальтами и андезибазальтами. Умеренно-магнезиальные ($Mg\# = 52–59$ мол. %) андезибазальты присутствуют среди моногенных конусов Харчинского озера. К редким разностям пород относятся высококалиевые базальты-андезибазальты даек в центре постройки влк. Харчинский и магнезиальные андезиты ($Mg\# = 58–61$ мол. %) экзструзий влк. Заречный. Большинство изученных пород демонстрирует типичное для островодужных пород обогащение крупноионными литофильными, легкими РЗЭ и обеднение высокочargedными элементами и тяжелыми РЗЭ. Высоко-К базальты и андезибазальты обнаруживают аномальное обогащение $Ba > 1000$ г/т, $Th > 3.8$ г/т, $U > 1.8$ г/т, $Sr > 800$ г/т, $Sr/Y > 50$ и легкими РЗЭ ($La > 20$ г/т) и близки к низкокремнистым адакитам. Базальты и андезибазальты всех изученных объектов содержат высоко-Mg фенокристаллы оливина (до $Fo_{92.6}$) и клинопироксена ($Mg\#$ до 91 мол. %). Породы демонстрируют петрографические и геохимические признаки фракционной кристаллизации, наряду с процессами кумуляции минералов и смешения магм. Часть вкрапленников оливина демонстрирует высокое содержание NiO (до 5000 г/т) и повышенное значение Fe/Mn (до 80), что интерпретировано как свидетельство участия в процессах магнообразования пироксенитового источника. Использование соотношений Ca/Fe и Ni/Mg позволило нам разграничить поля составов и тренды эволюции оливинов, связанных с различными источниками – перидотитовым и пироксенитовым, сформированными в результате реакции перидотитов мантийного клина и высоко-Si расплавов субдуцируемой океанической коры. Полученные данные согласуются с другими свидетельствами плавления краевой части субдуцирующей Тихоокеанской плиты под северным участком Центральной Камчатской депрессии в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг и свидетельствуют о значительной гетерогенности мантии в этом районе.

Ключевые слова: островодужные магмы, оливин, клинопироксен, пироксенитовый источник, Харчинский, Заречный, Камчатка

DOI: 10.31857/S0869590323030056, **EDN:** CDEEOS

ВВЕДЕНИЕ

Вулканы Харчинский и Заречный занимают уникальную геодинамическую позицию в зоне со-

членения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг над краевой частью субдуцирующей Тихоокеанской плиты (рис. 1). В отличие от многих других вулканов Восточного вулканического пояса Камчатки (ВВП), где магнезиальные ($Mg\# = 100Mg/(Mg + Fe) > 60$ мол. %) базальты слагают отдельные шлаковые и лавовые конусы ареальных

¹ Дополнительная информация для этой статьи доступна doi: 10.31857/S0869590323030056 для авторизованных пользователей.

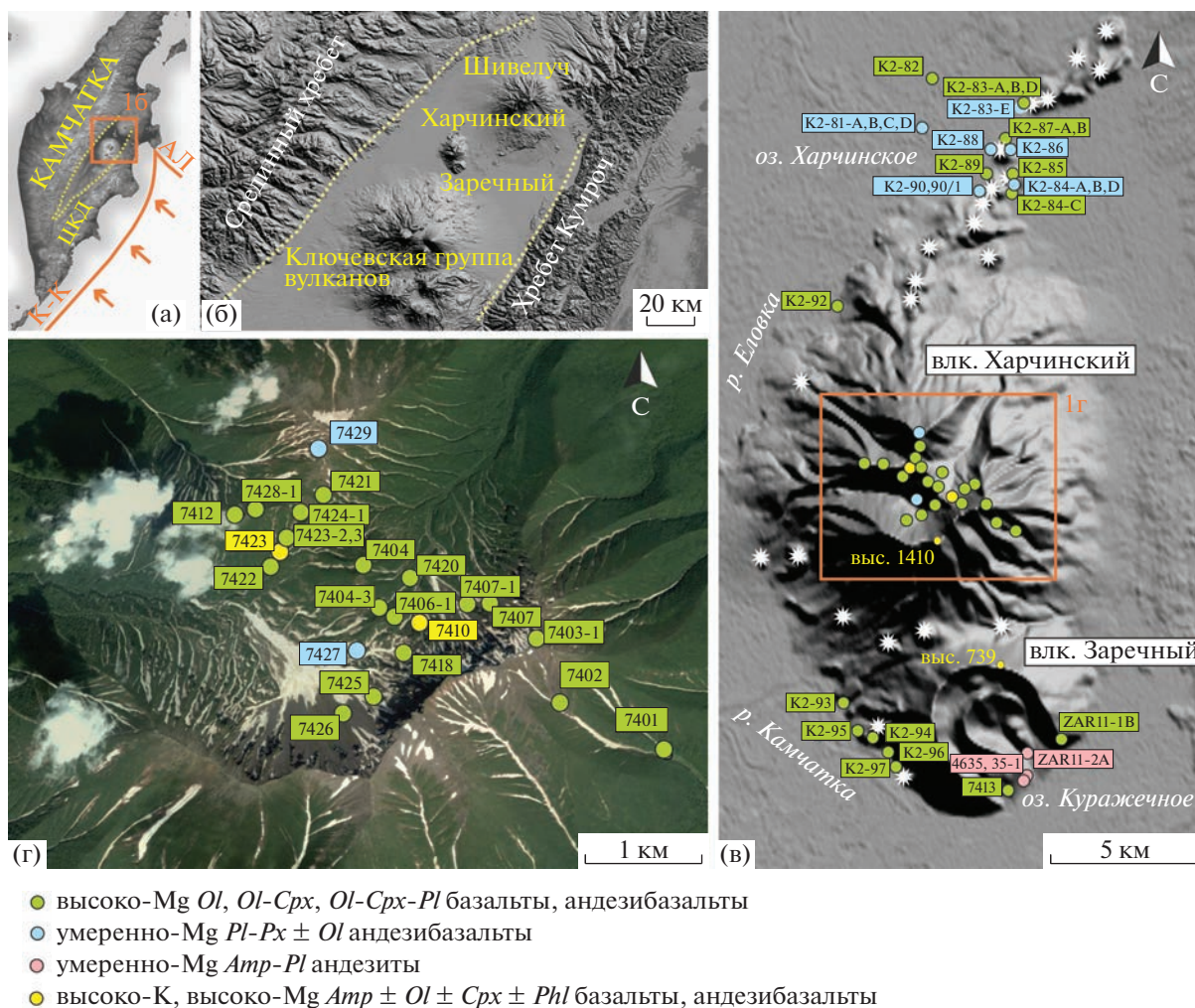


Рис. 1. Региональная позиция объектов исследования и схема отбора образцов. (а) — упрощенная схема полуострова Камчатка; обозначены Курило-Камчатский (К-К) и Алеутский (АЛ) глубоководные желобы; стрелками показано направление движения субдуцирующей Тихоокеанской плиты; (б) — местоположение вулканов Харчинский и Заречный относительно других объектов Центральной Камчатской депрессии (ЦКД); (в) — карта рельефа вулканов Харчинский и Заречный с местами отбора образцов; белыми звездами обозначены моногенные конусы, отдешифрированные нами на космических снимках (г) — спутниковый снимок кратера влк. Харчинский с местами отбора образцов.

зон или же единичные потоки в разрезах стратовулканов, в постройках вулканов Харчинский и Заречный подобные породы составляют большинство (Волынец и др., 1998, 1999). Уникальная геодинамическая позиция, преобладание высоко-Mg# лав среди изверженных продуктов и обилие коровых и мантийных ксенолитов в породах определяют повышенный интерес исследователей к данным объектам.

Первые описания вулканов и общие сведения по составу пород приведены в работах (Меняйлов, 1949; Огородов, Белоусов, 1961; Кутыева, Эрлиха, 1973). Подробное морфология, возраст, геологическое строение и вещественный состав пород описаны в (Волынец и др., 1998, 1999). В этих работах впервые представлена геохимическая характеристика пород и приведены первые данные

по составу минералов и условиям их кристаллизации. Предположено, что базальтовые и андезитовые расплавы отличались высоким содержанием воды (>3–4 и >6–7 мас. %, соответственно) и кристаллизовались при высокой футигитивности кислорода (на 2.0–2.5 порядка выше буфера NNO). В качестве магматического источника вулканов О.Н. Волынец с соавторами (1999) рассматривали сильно деплетированный мантийный источник (гарцбургит), обогащенный несовместимыми элементами в результате метасоматического воздействия глубинного флюида или частичных выплавов из субдуцированной плиты. В последующих работах (Portnyagin et al., 2007, 2009; Nikulin et al., 2012) было высказано предположение, что в происхождение магм вулканов Харчинский и Заречный возможен вклад пироксенитового (безоливиново-

го) источника, который образуется в результате реакции перидотитов мантийного клина и высоко-Si расплавов, возникающих при плавлении субдуцируемой океанической коры (например, Straub et al., 2008).

В настоящей работе мы приводим новые данные по геохимии и составу минералов для представительной коллекции образцов пород вулканов Харчинский и Заречный, а также зоны моногенных конусов Харчинского озера. Мы показываем, что несмотря на близкие к другим породам Центральной Камчатской депрессии вариации концентраций главных и рассеянных элементов в большинстве пород вулканов Харчинский и Заречный, их минералогические особенности, прежде всего состав фенокристаллов оливина, отражают существенную гетерогенность мантийного источника. Особенности эволюционных трендов составов пород, а также составов вкрапленников оливина и пироксенов указывают на значимую роль процессов смешения магм и кумуляции кристаллов при подъеме и дифференциации высоко-Mg# лав в коровых условиях.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вулканы расположены в северной части Центральной Камчатской депрессии на левом берегу р. Камчатка, на приблизительно одинаковом расстоянии (около 40 км) от Ключевской группы вулканов на юге и влк. Шивелуч на севере (рис. 1а, 1б). Сближенные постройки вулканов формируют субмеридионально вытянутый хребет, который окружен озерами, болотами и протоками рек Камчатка и Еловка (рис. 2а).

Вулкан Харчинский (абс. выс. 1410 м) — существенно лавовый стратовулкан, площадь которого составляет 150 км², а объем выраженной в рельефе постройки около 60 км³ (Волынец и др., 1998). Центральная часть вулкана разрушена в результате воздействия позднеплейстоценовых ледников, а также вулcano-тектонических и обвальных процессов. В настоящее время в вершинной части постройки сформирован цирк диаметром около 4 км. Восточные стенки цирка практически вертикальны и демонстрируют верхнюю часть лаво-пирокластического разреза мощностью около 600 м (рис. 2б).

В центральной части стратовулкана находится конусовидная возвышенность размером 2 × 2,5 км и высотой около 300 м. В ранних работах это образование было интерпретировано как лавовая пробка (Меняйлов, 1949) или некк (Кутыев, Эрлих, 1973), а в (Волынец и др., 1998) было сделано предположение о его подледном происхождении. Наши наблюдения больше согласуются с интерпретацией, изложенной в работе (Кутыев, Эрлих, 1973). Разрозненные останцы базальтов, которые

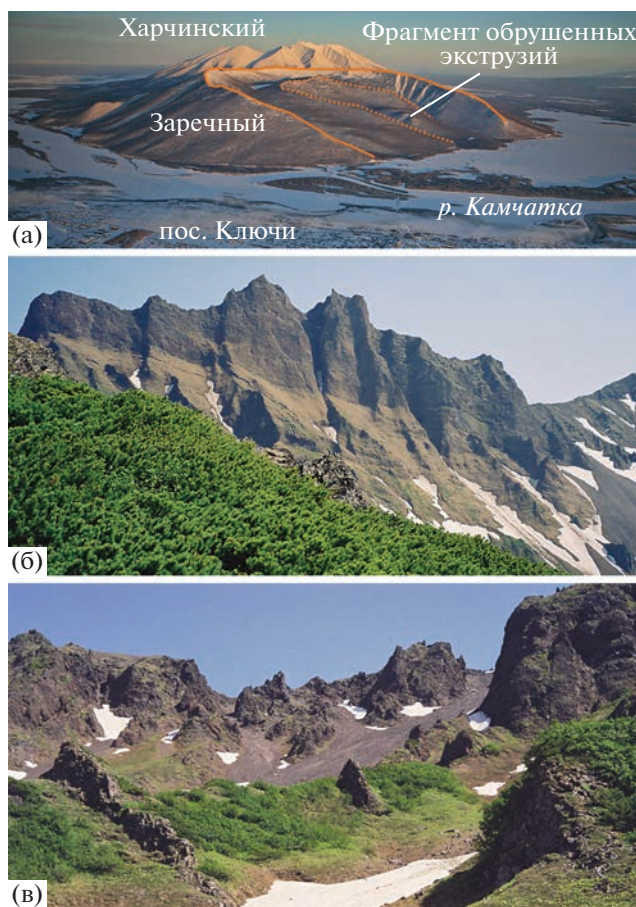


Рис. 2. Вид на вулканы Харчинский и Заречный с юго-востока (а) и особенности внутреннего строения центральной части влк. Харчинский (б, в). На рисунке (а) сплошная линия показывает контур внешнего конуса влк. Заречный, а пунктирная очерчивает кратер внутреннего конуса. Рисунок (б) иллюстрирует облик верхней части лаво-пирокластического разреза влк. Харчинский, вскрытого в юго-восточной стенке цирка; (в) — радиальные дайки внутри цирка.

наблюдаются в вершинной части конусовидной возвышенности, могут представлять собой фрагменты эродированного некка. Коренные выходы полнокристаллических пород, задокументированные нами в ~200 м гипсометрически ниже вершины некка (обр. 7420, рис. 1г), вероятно всего, свидетельствуют о том, что с глубиной некк переходит в субвулканическое образование. По периферии вершинного некка/субвулканического тела фиксируются поля радиально ориентированных даек (рис. 2в).

Вулкан Заречный (абс. выс. 739 м) расположен на южном склоне влк. Харчинский (см. рис. 2а). Его постройка состоит из внешнего конуса, разрушенного подковообразным кратером диаметром около 3,5 км. В центре кратера находится внутренний конус, который, согласно (Волынец и др., 1998), разрушен кратером обвального или

обвально-взрывного происхождения и вмещает фрагменты экструзий. Немногочисленные обнажения вдоль берега р. Камчатка и вершинного гребня, а также на восточном подножии вулкана вскрывают потоки базальтовых лав и прослойки шлаков, которые составляют внешний конус влк. Заречный.

На северных склонах влк. Харчинский, а также в пределах Харчинского озера расположены многочисленные моногенные конусы. На космических и аэрофотоснимках снимках дешифрируется не менее 15 таких образований, формирующих зону северо-восточного простираения протяженностью около 12 км (рис. 1в). Как правило, конусы имеют относительную высоту до 100 м и диаметр основания до 500 м и обнажены преимущественно вдоль береговой линии. Несколько конусов расположено на седловине между вулканами Харчинский и Заречный, а также на западных склонах обоих вулканов (рис. 1в).

Согласно (Волынец и др., 1998), постройка влк. Харчинский и внешний конус влк. Заречный были сформированы до начала второй стадии позднеплейстоценового оледенения. Предполагалось, что формирование моногенных шлаковых и лавовых конусов, а также внутрикратерных экструзий влк. Заречный происходило во время оледенения — от 23–24 до 11 тыс. лет назад (Волынец и др., 1998). Недавняя работа по реконструкции позднеплейстоценовых вулканических событий в районе Центральной Камчатской депрессии подтвердила данное предположение. В районе пос. Ключи в составе пирокластических разрезов были найдены тефры, по минеральному составу, а также по составу вулканического стекла пепловых частиц отвечающие породам внутрикратерных экструзий влк. Заречный. Возраст этих тефр и, соответственно, время формирования экструзий составляет 17–21 тыс. лет (Ponomareva et al., 2021).

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Схема опробования лав вулканов Харчинский и Заречный и зоны моногенных конусов Харчинского озера приведены на рис. 1в и 1г. Образцы пород зоны шлаковых конусов были отобраны авторами в ходе полевых работ в рамках российско-германского проекта КОМЕХ в 2002 г., лавы и дайки в центральной части влк. Харчинский опробованы в 2003–2004 гг. Дополнительные образцы экструзивных лав влк. Заречный отобраны в 2011 и 2013 гг. Список изученных образцов и их краткая характеристика приведены в табл. 1.

Определение главных элементов (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K и P) и некоторых элементов-примесей (V, Cr, Co, Ni, Ga, Sr, Rb, Ba, Zr, Nb, Y и Zn) в 51 образце выполнено рентгенофлуоресцентным методом (спектрометр PhillipsX 'Unique

PW1480) в Центре исследований океана им. Гельмгольца (GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, г. Киль, ФРГ). Вместе с образцами анализировались международные стандарты пород JB-2, JB-3 и JA-2 (Govindaraju, 1994; Jochum et al., 2016). Еще четыре анализа было дополнительно получено в лаборатории AcmeLab (г. Ванкувер, Канада). Анализы стандартных образцов приведены в Supplementary² 1, ESM_1.xlsx.

Содержания редких элементов в породах определялись методом масс-спектрометрии индуктивно-связанной плазмы с лазерной абляцией (LA-ICP-MS). При подготовке образцов для анализа была использована методика высокотемпературного экстремального плавления порошков пород. Сплавление порошков производилось в настольной цилиндрической лабораторной электропечи с нагревателем направленного действия и ручным регулятором температуры. Плавление 30–40 мг порошка, предварительно измельченного в агатовой мельнице, производилось на вольфрамовой подложке в потоке аргона. Подъем температуры происходил в два этапа: сначала осуществлялось высушивание образца при 900°C в течение 15 с, а затем — сплавление его при 1600°C в течение 10 с. Далее образцы закаливались в стекло при выключении источника питания. Вместе с порошками образцов лав вулканов Харчинский и Заречный были сплавлены также порошки стандартных образцов базальтов и андезибазальтов (BHVO-2, AGV-2, BCR-2). Полученные стекла монтировались в шашки с эпоксидной смолой и анализировались методом LA-ICP-MS с помощью спектрометра Agilent 7500cs, оснащенного системой лазерной абляции Excimer GeoLas Pro (Coherent) с длиной волны 193 nm (University of Kiel). Для каждого образца было выполнено по два анализа, для стандартных образцов — по четыре анализа. Анализы стандартных образцов приведены в Suppl. 1, ESM_2.xlsx, усредненные результаты измерений образцов — в Suppl. 1, ESM_4.xlsx. Из публикуемых данных были ис-

² В дополнительных материалах к русской и английской онлайн-версиям статьи на сайтах <https://elibrary.ru/> и <http://link.springer.com/> соответственно приведены Supplementary 1:

ESM_1.xlsx — Результаты измерений вторичных стандартов при выполнении рентгенофлуоресцентного анализа;
ESM_2.xlsx — Результаты измерений вторичных стандартов при выполнении ICP-MS анализа;
ESM_3.xlsx — Результаты измерений вторичных стандартов при выполнении электронно-зондового анализа;
ESM_4.xlsx — Валовый состав изученных образцов;
ESM_5.xlsx — Состав фенокристаллов оливина изученных образцов;
ESM_6.xlsx — Состав фенокристаллов пироксенов изученных образцов;
ESM_7.xlsx — Состав фенокристаллов амфибола изученных образцов;
ESM_8.xlsx — Состав фенокристаллов плагиоклаза изученных образцов.

Таблица 1. Каталог коллекции образцов вулканов Харчинский, Заречный и зоны моногенных конусов Харчинского озера

№ п/п	Номер образца	Географические координаты	Материал отбора	Петрографический тип
<i>Вулкан Харчинский</i>				
1	7401	N 56.421697 E 160.859557	Лавовый поток	<i>Ol-Cpx</i> базальт
2	7402	N 56.425866 E 160.844607	Лавовый поток	<i>Ol-Cpx-Pl</i> андезибазальт
3	7403-1	N 56.431280 E 160.841477	Лавовый поток	<i>Ol-Cpx-Pl</i> андезибазальт
4	7404	N 56.438089 E 160.814640	Некк	<i>Ol-Cpx-Pl</i> андезибазальт
5	7404-3	N 56.434157 E 160.817678	Некк	<i>Ol-Cpx-Pl</i> базальт
6	7406-1	N 56.433502 E 160.820078	Дайка	<i>Ol-Cpx-Pl</i> андезибазальт
7	7407	N 56.434475 E 160.834198	Лавовый поток	<i>Ol-Cpx-Pl</i> андезибазальт
8	7407-1	N 56.434475 E 160.834198	Лавовый поток	<i>Ol-Cpx-Pl</i> базальт
9	7410	N 56.432747 E 160.823741	Дайка	<i>Amp ± Ol ± Cpx ± Phl</i> андезибазальт
10	7412	N 56.443057 E 160.794491	Дайка	<i>Ol-Cpx-Pl</i> андезибазальт
11	7418	N 56.430212 E 160.821933	Дайка	<i>Ol-Cpx</i> базальт
12	7420	N 56.436873 E 160.822436	Субвулканическое тело	<i>Ol-Cpx-Pl</i> базальт
13	7421	N 56.444815 E 160.808141	Лавовый поток	<i>Ol-Cpx-Pl</i> андезибазальт
14	7422	N 56.438241 E 160.800451	Лавовый поток	<i>Ol-Cpx-Pl</i> базальт
15	7423	N 56.439364 E 160.801539	Дайка	<i>Amp ± Ol ± Cpx ± Phl</i> андезибазальт
16	7423-1	N 56.439364 E 160.801539	Дайка	<i>Ol-Cpx-Pl</i> базальт
17	7423-2	N 56.440272 E 160.802095	Дайка	<i>Ol-Cpx-Pl ± Amp</i> андезибазальт
18	7423-3	N 56.440272 E 160.802095	Дайка	<i>Ol-Cpx-Pl</i> базальт
19	7424-1	N 56.443159 E 160.804216	Дайка	<i>Ol-Cpx-Pl</i> базальт
20	7427	N 56.430279 E 160.814266	Дайка	<i>Ol-Cpx-Pl</i> базальт
21	7428-1	N 56.443576 E 160.769871	Дайка	<i>Ol-Cpx-Pl</i> базальт
22	7429	N 56.449730 E 160.806914	Дайка	<i>Ol-Cpx-Pl</i> базальт
23	K2-92	N 56.489710 E 160.763649	Лавовый поток	<i>Ol</i> -базальт
<i>Вулкан Заречный</i>				
24	K2-93	N 56.372163 E 160.763055	Блоки лавы	<i>Ol</i> -базальт
25	K2-94	N 56.358143 E 160.777250	Блоки лавы	<i>Ol-Cpx-Pl</i> андезибазальт
26	K2-95	N 56.361317 E 160.771447	Блоки лавы	<i>Px-Pl ± Ol</i> андезибазальт
27	K2-96	N 56.354335 E 160.789526	Лавовый поток	<i>Ol-Cpx-Pl</i> андезибазальт
28	K2-96B	N 56.354335 E 160.789526	Лавовый поток	<i>Ol-Cpx-Pl</i> андезибазальт
29	K2-97	N 56.351693 E 160.791163	Блоки лавы	<i>афировый</i> андезибазальт
30	7413	N 56.363718 E 160.893481	Лавовый поток	<i>Ol-Cpx-Pl</i> базальт
31	ZAR-11-1B	N 56.361150 E 160.889480	Лавовый поток	<i>Ol-Cpx</i> андезибазальт
32	ZAR-11-2A	N 56.354934 E 160.863125	Экструзия	<i>Amp</i> -андезит
33	7635	N 56.355446 E 160.869022	Экструзия	<i>Amp</i> -андезит
34	7635-1	N 56.355446 E 160.869022	Экструзия	<i>Amp</i> -андезит
<i>Моногенные конусы</i>				
35	K2-81A	N 56.539723 E 160.829966	Блоки лавы	<i>Px-Pl ± Ol</i> андезибазальт
36	K2-81B	N 56.539723 E 160.829966	Блоки лавы	<i>Px-Pl ± Ol</i> андезибазальт
37	K2-81C	N 56.539723 E 160.829966	Блоки лавы	<i>Px-Pl ± Ol</i> андезибазальт
38	K2-81D	N 56.539723 E 160.829966	Блоки лавы	<i>Px-Pl ± Ol</i> андезибазальт
39	K2-82	N 56.559460 E 160.832021	Блоки лавы	<i>Ol</i> -базальт
40	K2-83A	N 56.548607 E 160.872601	Блоки лавы	<i>Ol-Cpx</i> базальт

Таблица 1. Окончание

№ п/п	Номер образца	Географические координаты	Материал отбора	Петрографический тип
41	K2-83B	N 56.548607 E 160.872601	Блоки лавы	<i>Ol-Cpx</i> базальт
42	K2-83D	N 56.548607 E 160.872601	Блоки лавы	<i>Ol-Cpx-Pl</i> базальт
43	K2-83E	N 56.548607 E 160.872601	Блоки лавы	<i>Px-Pl ± Amp</i> андезибазальт
44	K2-84A	N 56.525857 E 160.860162	Блоки лавы	<i>Px-Pl ± Ol</i> андезибазальт
45	K2-84B	N 56.525857 E 160.860162	Блоки лавы	<i>Ol-Cpx-Pl</i> андезибазальт
46	K2-84C	N 56.525857 E 160.860162	Блоки лавы	<i>Ol-Cpx</i> базальт
47	K2-84D	N 56.525857 E 160.860162	Блоки лавы	<i>Px-Pl ± Ol</i> андезибазальт
48	K2-85	N 56.528581 E 160.868343	Лавовый поток	<i>Ol-Cpx</i> базальт
49	K2-86	N 56.536477 E 160.861917	Блоки лавы	<i>Px-Pl ± Ol</i> андезибазальт
50	K2-87A	N 56.538908 E 160.857641	Лавовый поток	<i>Ol-Cpx</i> базальт
51	K2-87B	N 56.538908 E 160.857641	Лавовый поток	<i>Ol-Cpx</i> базальт
52	K2-88	N 56.536151 E 160.851797	Блоки лавы	<i>Ol-Cpx</i> андезибазальт
53	K2-89	N 56.527335 E 160.848733	Блоки лавы	<i>Ol-Cpx</i> андезибазальт
54	K2-90	N 56.522584 E 160.841747	Блоки лавы	<i>Px-Pl ± Ol</i> андезибазальт
55	K2-90/1	N 56.522057 E 160.839662	Блоки лавы	<i>Px-Pl ± Ol</i> андезибазальт

ключены результаты, полученные для вольфрама, как элемента с завышенными концентрациями вследствие контаминации от нагревателя, и для элементов с систематически заниженными концентрациями, вследствие их летучести либо диффузии в нагреватель (Cu, Zn, As, Sb, Mo, Pb).

Состав пороодообразующих минералов изучен в мономинеральных прозрачно-полированных препаратах на электронном зонде JEOL JXA-8200 в GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel (г. Киль, ФРГ), оборудованном пятью спектрометрами с дисперсией по длинам волн. Анализ проводился фокусированным пучком при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе зонда 100 нА для оливина и 20 нА для плагиоклаза, амфибола и пироксена. Для контроля качества анализов использовались природные минералы, международные стандарты для электронно-зондового микроанализа (Jarosewich et al., 1980). Результаты измерений вторичных стандартов приведены в Suppl. 1, ESM_3.xlsx. Результаты анализов минералов приведены в ESM_5.xlsx–ESM_8.xlsx (Suppl. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Петрография пород

Среди пород нашей коллекции мы выделили пять основных петрографических типов — оливиновые (*Ol*³) и оливин-клинопироксеновые (*Ol-Cpx*) базальты, оливин-клинопироксен-плагиоклазовые (*Ol-Cpx-Pl*) базальты и андезибазальты, пи-

роксен-плагиопорфировые (*Px-Pl ± Ol*) андезибазальты и амфиболовые (*Amp*) андезиты. Редким петрографическим типом не только в числе пород вулканов Харчинский и Заречный, но и в целом среди четвертичных лав Камчатки являются *Amp ± Ol ± Cpx ± Pl* базальты-андезибазальты. По минеральному составу и структурным особенностям, а именно по присутствию в числе фенокристаллов исключительно Fe-Mg минералов, среди которых преобладает амфибол, эти породы можно отнести к породам лампрофирового ряда — спессартитам (Петрографический ..., 2008).

Ol- и *Ol-Cpx* базальты (рис. 3а, 3б) слагают монокристаллические конусы в районе Харчинского озера, отдельные лавовые потоки вершинной части влк. Харчинский и соммы влк. Заречный. Породы содержат от ~10 до 25 об. % вкрапленников и имеют серийно-порфировую структуру, которая обусловлена присутствием нескольких генераций фенокристаллов оливина. Как правило, по размерности выделяется две генерации — крупные (1–2 мм) кристаллы, которые иногда образуют мономинеральные гломеропорфировые сростки, и мелкие (>0.8 мм) округлые зерна. В одном из образцов (обр. K2-92) кроме перечисленных двух генераций оливина присутствуют и мегавкрапленники размером до 5–6 мм (рис. 3а). Все оливины в большинстве случаев идиоморфны, однако в отдельных образцах можно наблюдать и скелетные формы. Вкрапленники клинопироксена единичны в *Ol*-базальтах, а в *Ol-Cpx* составляют до 10 об. %. Для этих пород типичны гломеропорфировые сростки, в которых крупные ритмично-зональные фенокристаллы авгита содержат в центре ре-

³ Аббревиатура минералов дана по (Whitney, Evans, 2010).

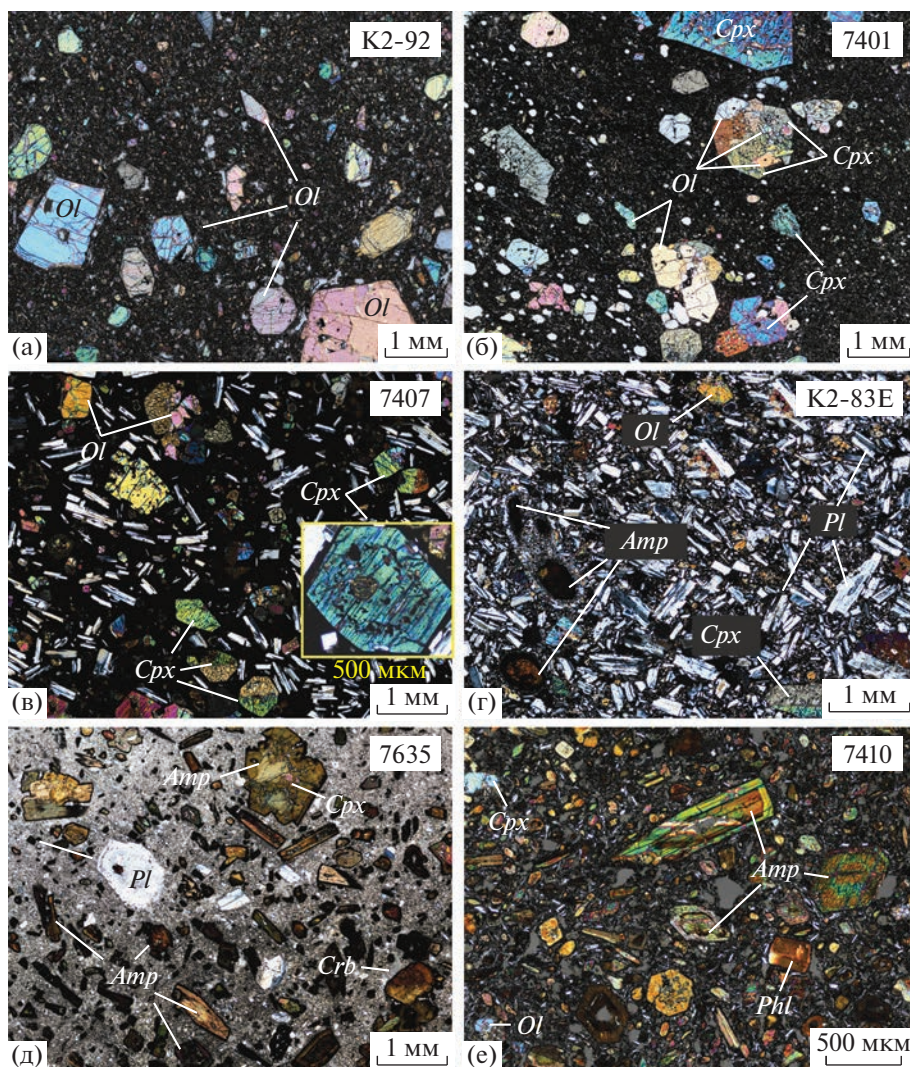


Рис. 3. Основные петрографические различия пород вулканов Харчинский и Заречный. (а) — оливиновые базальты влк. Харчинский; (б) — оливин-клинопироксеновые базальты влк. Харчинский; (в) — оливин-клинопироксен-плагиоклазовые базальты влк. Харчинский; на врезке представлен типичный зональный вкрапленник клинопироксена с внутренней зоной, переполненной включениями расплава; (г) — пироксен-плагиоклазовые амфиболсодержащие андезитобазальты моногенных конусов; (д) — амфиболовые андезиты экструзий влк. Заречный; (е) — амфиболовые (оливин-, клинопироксен- и флогопитсодержащие) базальты-андезитобазальты даек центральной части влк. Харчинский. *Amp* — амфибол, *Cpx* — клинопироксен, *Crb* — кристобалит, *Ol* — оливин, *Pl* — плагиоклаз, *Phl* — флогопит.

ликты раннего оливина, а по краям обрастают идиоморфным более поздним и более железистым оливином (рис. 3б). Основная масса *Ol*- и *Ol-Cpx* базальтов гиалопилитовая или микролитовая, состоит из вулканического стекла и мелких зерен пироксенов и оливина, магнетита и небольшого количества рассеянных лейст плагиоклаза.

Ol-Cpx-Pl базальты-андезитобазальты (рис. 3в) преобладают среди лав влк. Харчинский. Среди темноцветных вкрапленников этих пород преобладает клинопироксен ~10–12 об. %, оливин составляет около 7–10 об. %, в подчиненном количестве (2–4%) присутствует и ортопироксен. Для этих пород типично обилие (до 15–20 об. %) субфе-

нокристаллов плагиоклаза, равномерно распределенных между Fe-Mg вкрапленниками (рис. 3в). Еще одной отличительной чертой *Ol-Cpx-Pl* лав являются ритмично-зональные кристаллы авгита с внутренней зоной резорбции и обилием включений расплава. В составе основной массы пород — микролиты плагиоклаза, пироксенов и переменное количество стекла и титаномagnetита.

Большая часть даек центральной части влк. Харчинский петрографически близка описанным выше лавам, однако в их числе отмечаются и полнокристаллические разновидности. Последние неравномерно раскристаллизованы, имеют долеритовые, интерсертальные, иногда офитовые основные мас-

сы. Сложены идиоморфными таблитчатыми кристаллами плагиоклаза (лабрадор-битовнит), менее идиоморфными зернами клинопироксена и оливина, рудными минералами (титаномagnetит, ильменит).

$Px-Pl \pm Ol$ андезибазальты (рис. 3г) слагают отдельные конусы Харчинского озера, где ассоциируют с лавами Ol -базальтов (рис. 1в). Среди фенокристаллов этих пород резко преобладает плагиоклаз (до 20–25 об. %), пироксены находятся в резко подчиненном количестве (7–10 об. %). Оливин (0–3 об. %) представляет собой либо округлые мелкие резорбированные (0.5–0.8 мм) зерна, окруженные мелкозернистым $Px-Pl$ агрегатом, либо сохраняется в виде реликтов в центре крупных гломеропорфировых сростков пироксенов. Преобладающие в породах вкрапленники плагиоклаза имеют размер 1–1.5 мм и часто обнаруживают ситовидную текстуру — их центральные зоны переполнены мелкими включениями стекла. Клинопироксены преимущественно представлены идиоморфными призматическими кристаллами размером 0.5–0.8 мм. Клинопироксен гломеропорфировых сростков отличается более крупными размерами и интенсивной резорбцией краевых частей. Ортопироксен развит в краевых частях гломеропорфировых сростков, а также в виде субвкрапленников. Основная масса этих пород преимущественно микролитовая с обилием рудного минерала.

В одном из образцов этой группы пород (обр. K2-83Е, рис. 3г) обнаружены реликты роговой обманки, полностью опацитизированные или же сохранившиеся в виде небольших фрагментов в двойной кайме — внутренней опацитовой и внешней, состоящей из мелкозернистого $Px-Pl-Mag$ агрегата.

Amp -андезиты (рис. 3д) слагают внутрикратерные экструзии влк. Заречный. Амфибол с тонкой опацитовой каймой резко преобладает в числе фенокристаллов (до 25 об. %), плагиоклаза в породах существенно меньше (5–7 об. %). Наиболее крупные кристаллы амфибола в ядрах содержат реликты клинопироксена, а иногда и оливина. В микрокристаллической основной массе андезитов кроме обильных микролитов плагиоклаза присутствуют выделения кристобалита и калиевого полевого шпата.

$Amp \pm Ol \pm Cpx \pm Phl$ базальты-андезибазальты (рис. 3е) были обнаружены нами в двух дайках (обр. 7410, 7423, рис. 1г) вблизи центрального нека влк. Харчинский. Породы аналогичного состава были описаны также и в пределах нека/субвулканического тела (Волюнец и др., 1999; Секисова и др., 2021; Siegrist et al., 2019). Это светло-серые породы с лампрофировой структурой — фенокристаллы представлены, главным образом, амфиболом (~30 об. %) и небольшим количеством резорбированных зерен оливина и клино-

пироксена. В незначительных количествах присутствуют выделения слюды, отвечающей флогопиту с $Mg\# = 82–85$ мол. % (Волюнец и др., 1999). Основная масса пород сложена микролитами плагиоклаза, амфибола и, согласно (Волюнец и др., 1999), единичными выделениями калиевого полевого шпата.

Валовый состав пород

Большая часть изученных пород вулканов Харчинский и Заречный является базальтами и андезибазальтами умеренно-К серии (рис. 4а, 4б). $Amp \pm Ol \pm Cpx \pm Phl$ базальты-андезибазальты (обр. 7410 и 7423) влк. Харчинский аномально обогащены K_2O и попадают в области высоко-К андезибазальтов и шошонитов (рис. 4б). Магнезиальность пород варьирует от 75 мол. % в Ol - и $Ol-Cpx$ базальтах до 52 мол. % в $Px-Pl \pm Ol$ андезибазальтах при содержании MgO от 14.16 до 4.42 мас. % соответственно. Образец K2-92 аномально обогащен MgO (рис. 4в, 4г), Ni и Cr (Suppl. 1, ESM_4.xlsx), что говорит о его кумулятивной природе. Экструзивные лавы влк. Заречный представлены андезитами ($Mg\# = 60–61$ мол. %), состав которых близок породам влк. Шивелуч (рис. 4). Раннее обеднение некоторых из изученных пород по содержанию TiO_2 (рис. 4в) может говорить об их гибридной природе — смешении примитивных и дифференцированных магм.

Распределение рассеянных элементов в изученных образцах характерно для надсубдукционных пород. Оно выражается в отрицательных аномалиях содержаний некоторых высоkozарядных элементов (HFSE) и положительных аномалиях содержаний крупноионных литофильных элементов (LILE). Характер распределения рассеянных элементов и их абсолютные содержания практически идентичны между всеми группами пород (рис. 5а–5в). Исключением являются образцы $Amp \pm Ol \pm Cpx \pm Phl$ базальтов-андезибазальтов, проявляющие аномальное обогащение по содержанию ряда неконсервативных элементов — Ba , U , Th , La , Ce , Pr , Sr , Nd , Zr , Sm , Eu и Gd (рис. 5г). Обращает на себя внимание обогащение данных пород Ba относительно Rb , содержание которого находится на том же уровне, что и в случае умеренно-К пород.

Изученные образцы умеренно-К пород вулканов Харчинский и Заречный имеют тот же характер распределения рассеянных элементов и тот же диапазон их абсолютных содержаний, что и умеренно-К породы соседних вулканов — влк. Ключевской (Churikova et al., 2001) и влк. Шивелуч (Горбач, Портнягин, 2011; Gorbach et al., 2013) (рис. 5д). В то же время обогащенные K_2O породы влк. Харчинский не имеют аналогов среди лав близлежащих вулканов — высоко-К лавы влк.

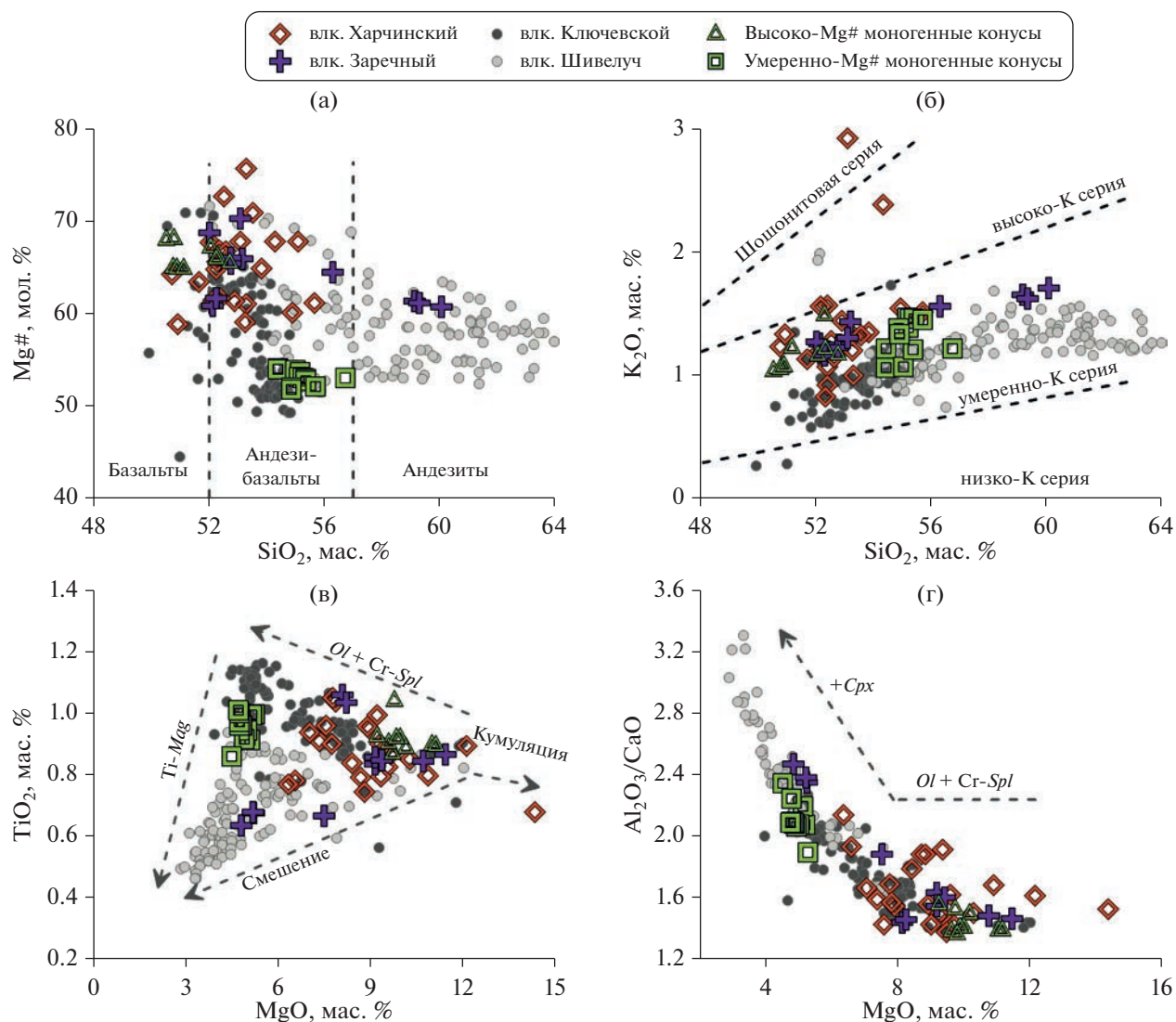


Рис. 4. Особенности содержаний петрогенных компонентов в изученных образцах. Состав пород влк. Шивелуч взят из работ (Горбач, Портнягин, 2011; Gorbach et al., 2013), состав пород влк. Ключевской взят из ряда работ, внесенных в базу данных GEOROC. Классификационные линии нанесены в соответствии с (Gill, 2011).

Шивелуч не имеют схожих уровней обогащения некогерентными элементами (рис. 5е).

СОСТАВ МИНЕРАЛОВ

Оливин

Состав вкрапленников оливина изученных образцов варьирует в широком диапазоне как для главных, так и для второстепенных элементов (рис. 6). Магнезиальность оливина покрывает диапазон от 70.4 до 92.6 мол. %. Наиболее магнезиальный оливин ($Mg\# > 90$ мол. %) встречается в образцах *Ol-Crx* и *Ol-Crx-Pl* лав постройки вулканов Харчинский (обр. 7424-1) и Заречный (обр. K2-94, 7413 и ZAR-11-1В). Оливин с $Mg\# > 92$ мол. % в центральных частях зерен найден только в образце

дайки центральной части постройки влк. Харчинский (обр. 7424-1). Кристалл, имеющий $Mg\# = 92.6$ мол. %, повторяет максимальные значения для четвертичных лав Камчатки, зафиксированные ранее только для оливина пород извержения влк. Шивелуч 3600 ^{14}C лет назад (Горбач, Портнягин, 2011). Наименее магнезиальный оливин встречается в образцах *Px-Pl ± Ol* андезибазальтов (обр. K2-84В) и базальтов (обр. K2-85) моногенных конусов, а также в отдельных разностях базальтов построек вулканов Харчинский (обр. 7429) и Заречный (обр. K2-96В).

Содержание Ni в оливине изученных образцов закономерно коррелирует с $Mg\#$ (рис. 6а), увеличиваясь от нескольких сотен г/т при $Mg\# = 70$ до почти 5000 г/т при $Mg\# = 92.6$ мол. %. При этом

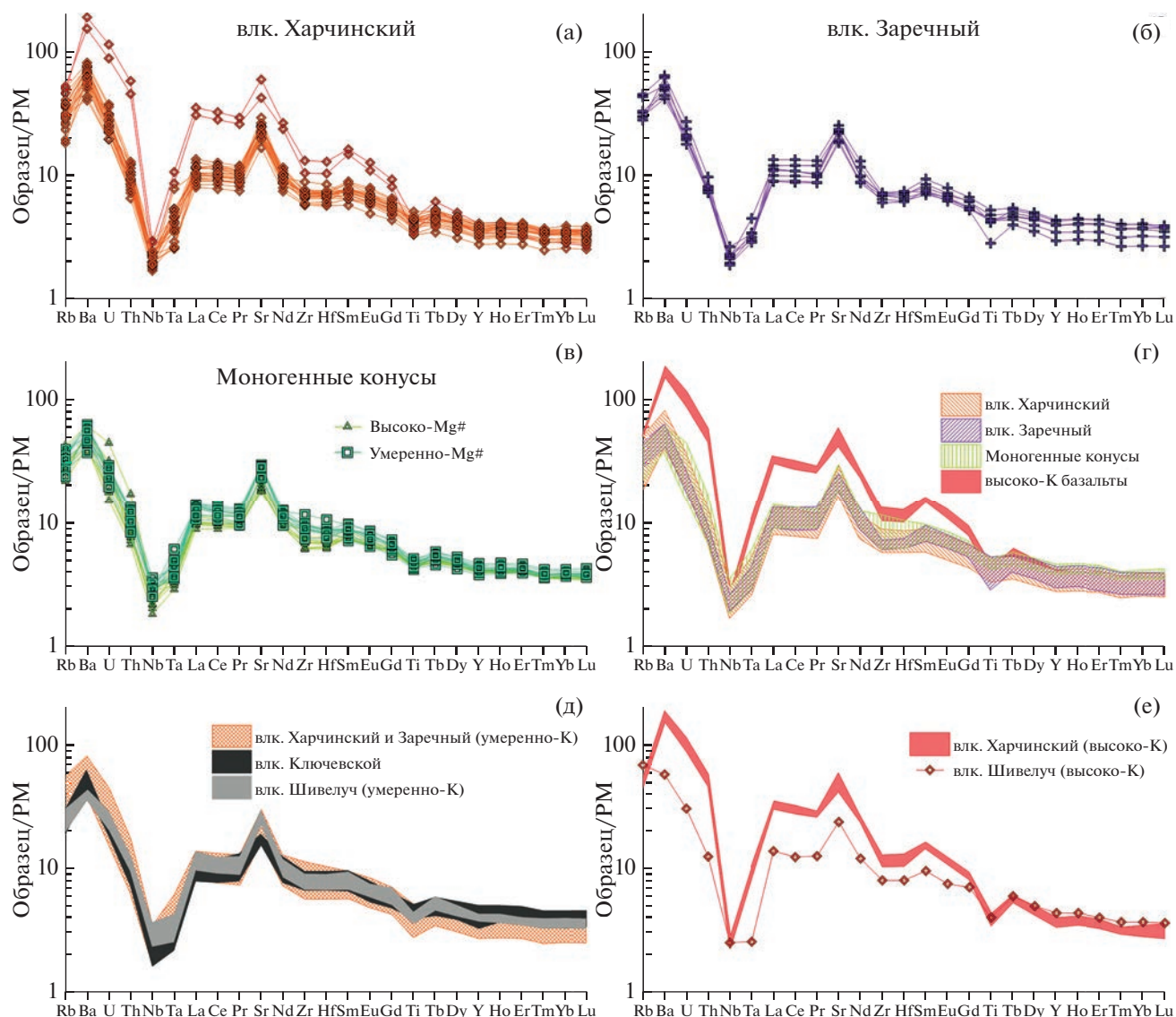


Рис. 5. Спектры распределения рассеянных элементов в изученных образцах. Содержания нормированы на теоретические содержания элементов в примитивной мантии (PM, Sun, McDonough, 1989). Состав пород влк. Шивелуч взят из работ (Горбач, Портнягин, 2011; Gorbach et al., 2013), состав пород влк. Ключевской взят из работы (Churikova и др., 2001).

оливин из образцов постройки влк. Харчинский в целом обеднен Ni относительно оливина из образцов влк. Заречный при $Mg\# < 88$ мол. % и обогащен при $Mg\# > 88$ мол. %. Однако наиболее магнезиальные вкрапленники оливина обоих вулканов имеют аномально высокое содержание Ni относительно оливина MORB и других вулканов ВВП. Оливин из образцов моногенных конусов подчиняется тренду изменения содержания Ni в оливине влк. Харчинский, за исключением образца оливина K2-85.

Содержание Ca в оливине изученных образцов варьирует от 700 до 2000 г/т (рис. 6б). Наиболее магнезиальный оливин всех групп пород имеет примерно совпадающие концентрации Ca от 700 до

1000 г/т, однако с падением магнезиальности проявляются различия для пород основных построек влк. Харчинский (рост содержания Ca) и влк. Заречный (субгоризонтальный тренд). Оливин из образцов моногенных конусов следует в основном субгоризонтальному тренду, за исключением обр. K2-83А и K2-90/1.

Содержание Mn в оливине закономерно возрастает с падением его магнезиальности, что проявляется в величине Fe/Mn (рис. 6в). Для большей части образцов всех трех групп пород значение Fe/Mn в оливине с $Mg\# > 80$ мол. % находится в интервале 55–70, что соответствует нормальным значениям для оливина других вулканов ВВП, кроме оливина извержения влк. Ши-

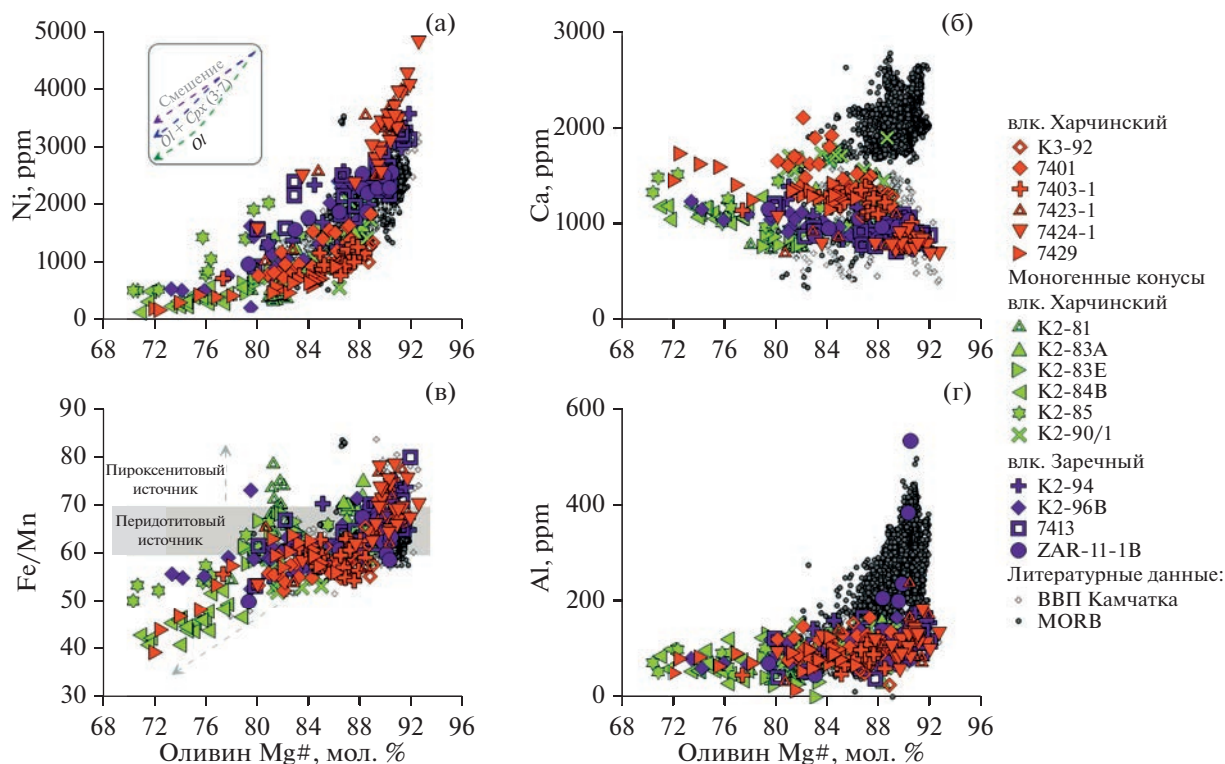


Рис. 6. Особенности состава оливина изученных пород. Состав оливина базальтов срединно-океанических хребтов приведен в соответствии с работой (Sobolev et al., 2007), состав оливина в породах других вулканов Камчатки — (Nekrylov et al., 2022). Поле типичных для перидотитов значений Fe/Mn нанесено в соответствии с (Herzberg, 2011). Тренды изменения содержания Ni в оливине нанесены в соответствии с (Herzberg et al., 2013).

велуч 3600 лет назад. Повышенные значения Fe/Mn проявлены для оливина обр. 7423-1 и 7424-1 (влк. Харчинский), обр. K2-94 и 7413 (влк. Заречный), обр. K2-81 и K2-83A (моногенные конусы). Величина Fe/Mn в оливине с Mg# < 80 мол. % снижается, что может быть связано с началом кристаллизации Ti-магнетита.

Содержание Al в оливине изученных образцов составляет в среднем 100 г/т и не коррелирует с его Mg# (рис. 6г). Данные значения совпадают с типичными содержаниями Al в оливине других объектов ВВП (103 ± 60 г/т, Nekrylov et al., 2022).

Пироксены

Магнезиальность вкрапленников *Cpx* ($Wo_{39-46}En_{40-48}Fs_{5-15}$) в изученных породах варьирует от 72.6 до 91 мол. %. Наиболее магнезиальный клинопироксен (Mg# ≥ 88 мол. %) отмечен в *Ol*- и *Ol-Cpx* базальтах постройки влк. Харчинский и моногенных конусов (обр. K2-83A, K2-85, K2-94, K2-96B, 7403-1 и 7429). Для *Ol-Cpx-Pl* базальтов и *Px-Pl ± Ol* андезобазальтов моногенных конусов типичны клинопироксены с Mg# ≤ 85–87 мол. % в ядрах и внутренних зонах кристаллов. Наименее магнезиальными (Mg# ≤ 78 мол. %) являются краевые части кристаллов во всех типах пород.

Среди зональных кристаллов *Ol-Cpx-Pl* базальтов присутствует *Cpx* с магнезиальными (Mg# = 87 мол. %) и железистыми (Mg# = 77 мол. %) ядрами, часто сочетающимися в одном образце. Магнезиальные ядра обычно окружены несколькими зонами, состав которых демонстрирует осцилляции магнезиальности в 5–6 мол. %. Железистые ядра обычно обрамляются зоной резорбции с обилием включений расплава и обрастают зоной более магнезиального (Mg# = 84 мол. %) состава.

Содержание TiO_2 во вкрапленниках *Cpx* обратно коррелирует с магнезиальностью, изменяясь в среднем от 0.2 мас. % при Mg# = 90 мол. % до 0.9 мас. % при Mg# = 73 мол. % (рис. 7а). Из общего тренда выделяются высокомагнезиальные вкрапленники *Cpx* влк. Заречный (обр. K2-96B и ZAR-11-1B) и вкрапленники *Cpx* группы моногенных конусов (обр. K2-85 и K2-83A), которые характеризуются пониженным содержанием TiO_2 .

По содержанию CaO вкрапленники *Cpx* всех групп пород и объектов близки за редким исключением. На трендах изменения составов видно, что наиболее железистый *Cpx* из образцов вулканов Харчинский и Заречный резко обеднен CaO по сравнению с *Cpx* пород моногенных конусов (рис.

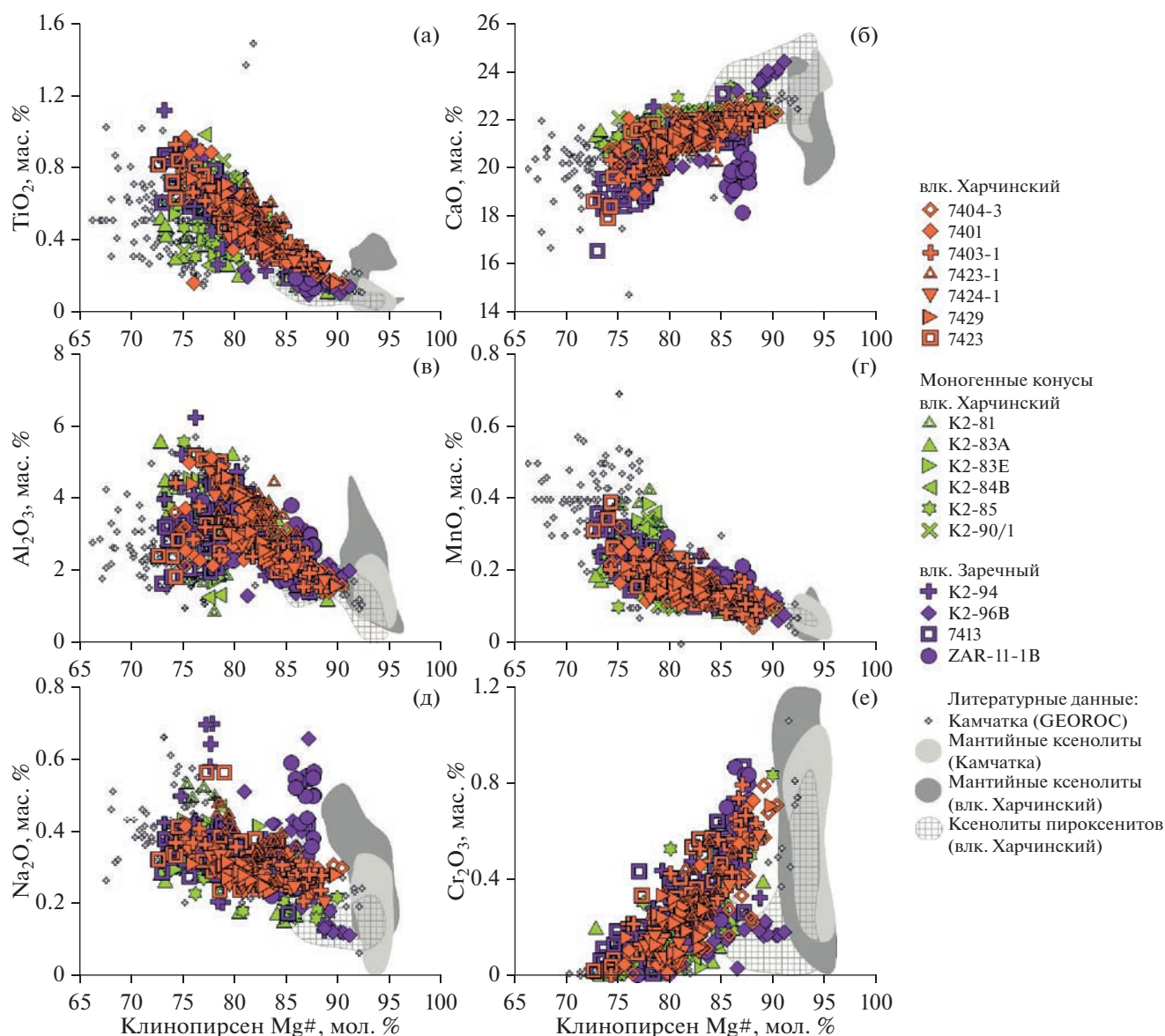


Рис. 7. Особенности состава клинопироксена (*Cpx*) изученных пород. Состав *Cpx* перидотитовых и пироксенитовых ксенолитов из лав влк. Харчинский нанесен в соответствии с работой (Siegrist et al., 2019), состав *Cpx* перидотитовых ксенолитов из лав других вулканов Камчатки взят из ряда работ, внесенных в базу данных GEOROC.

76). Из общего тренда выделяются и образцы влк. Заречный K2-96B и ZAR-11-1B, которые проявляют аномальное обогащение и обеднение данным компонентом соответственно.

По содержаниям Al_2O_3 и MnO вкрапленники *Cpx* не проявляют каких-либо значимых специфических различий между образцами вулканов и отдельными образцами. Их состав закономерно изменяется в соответствии с вкрапленниками *Cpx* других вулканов Камчатки (по базе данных GEOROC, рис. 7в, 7г).

По содержанию Na_2O во вкрапленниках *Cpx*, как и в случае с CaO , существенно выделяются обр. K2-96B и ZAR-11-1B влк. Заречный (рис. 7д).

Часть кристаллов *Cpx* из обр. ZAR-11-1B (а также обр. K2-94) резко обогащены по содержанию Na_2O , а *Cpx* обр. K2-96B, наоборот, обеднен этим компонентом. Кроме того, заметное обеднение по содержанию Na_2O проявляют вкрапленники *Cpx* некоторых образцов моногенных конусов (обр. K2-85 и K2-83A).

Содержание Cr_2O_3 во вкрапленниках *Cpx* всех групп пород прямо коррелирует с $\text{Mg\#}$ и уменьшается от 0.8 мас. % при $\text{Mg\#} = 90$ мол. % до предела обнаружения при $\text{Mg\#} = 73$ мол. % (рис. 7е). Исключением являются только вкрапленники *Cpx* обр. K2-96B, где содержание Cr_2O_3 является аномально низким относительно *Cpx* со схожей

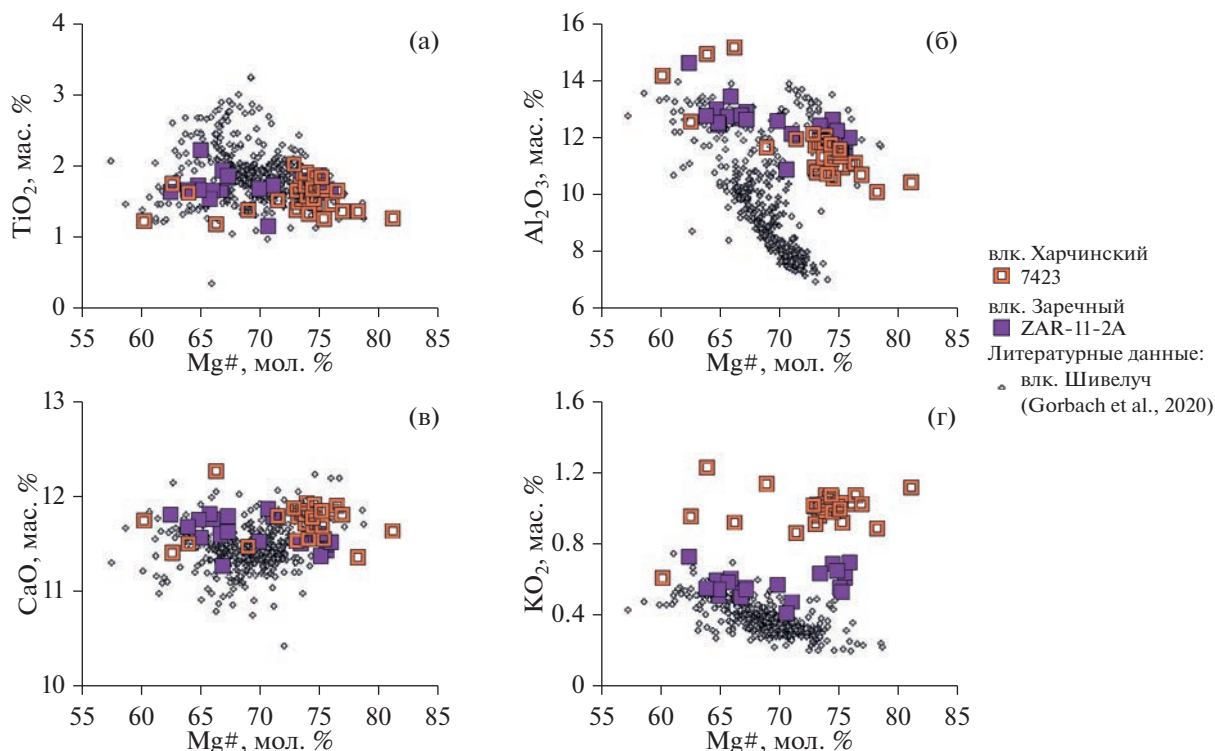


Рис. 8. Особенности состава амфиболов высоко-К базальтов-андезибазальтов влк. Харчинский и андезитов влк. Заречный. Состав вкрапленников амфиболов пород влк. Шивелуч взят из работ (Горбач, Портнягин, 2011; Gorbach et al., 2020).

магнезиальностью из других образцов и не проявляет зависимости от нее.

Необходимо отметить, что вкрапленники *Срх* обр. К2-96В на всех диаграммах состава попадают в поле *Срх* из ксенолитов пироксенитов влк. Харчинский (Siegrist et al., 2019). Данный факт может говорить о том, что вкрапленники *Срх* в этом образце по большей части представляют собой ксенокристаллы дезинтегрированных мантийных или нижнекоровых ксенолитов.

Амфибол

Состав амфиболов был изучен в обр. 7423 высоко-К базальта влк. Харчинский и обр. ZAR-11-2A андезитов влк. Заречный. В обоих образцах амфибол по составу относится к ряду паргасит–Мг-гастингсит по (Leake et al., 1997). Магнезиальность амфиболов в изученных образцах варьирует от 81.2 и 76 мол. % в центральных частях вкрапленников до 60.2 и 62.5 мол. % в краевых частях соответственно (рис. 8).

Содержание TiO₂ во вкрапленниках амфиболов обоих образцов варьирует в пределах от 1 до 2.5 мас. % (рис. 8а), не проявляя корреляции с Mg#. Содержание Al₂O₃ возрастает с падением Mg# от 10 до 15 мас. % для обр. 7423 и от 11.5 до 14.5 мас. % для обр. ZAR-11-2A (рис. 8б). При

этом среднее содержание Al₂O₃ при одной и той же магнезиальности выше в обр. ZAR-11-2A. Содержание CaO не проявляет значимых корреляций с Mg# и различий между образцами, варьируя в пределах от 11.2 до 12.5 мас. % (рис. 8в).

K₂O является единственным компонентом, по которому вкрапленники амфиболов изученных образцов существенно различаются. Среднее содержание K₂O в амфиболовых образцах вулканов Харчинский и Заречный составляет 0.9 и 0.5 мас. % соответственно (рис. 8г). По содержанию этого компонента изученные амфиболы систематически более обогащены по сравнению с амфиболами из андезитов влк. Шивелуч, что особенно характерно для высокомагнезиальных амфиболов с Mg# > 72 мол. %.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вклад пироксенитового источника

Состав оливины изученных образцов обладает рядом особенностей, указывающих на минералогическую гетерогенность мантийных источников вулканов Харчинский и Заречный. Содержание Ni и величина Fe/Mn в оливине большей части образцов соответствуют таковым в оливине, кристаллизующейся из расплавов перидотитового

источника (рис. 6а, 6в). Однако обращает на себя внимание аномальное обогащение Ni высокомагнезиального оливина влк. Харчинский (обр. 7403-1, вершинные лавы; обр. 7423-1 и 7424-1, дайки в центре постройки), достигающее почти 5000 г/т и существенно превышающее значение, типичное для продуктов плавления перидотитового источника (Herzberg, 2011; Sobolev et al., 2007; Straub et al., 2008). Для обр. 7423 влк. Харчинский концентрация никеля 4495 г/т была зафиксирована и при помощи высокоточных определений (LA-ICP-MS) содержаний микроэлементов в оливине (Портнягин и др., 2017). Содержание Ni в высокомагнезиальном оливине влк. Заречный не настолько высокое, однако в обр. K2-94 и 7413 оно достигает почти 3500 г/т, что в пределах ВВП Камчатки соответствует только некоторым образцам влк. Шивелуч (Горбач, Портнягин, 2011).

На данный момент аномально высокое содержание Ni (>3500 г/т) в оливине вулканов Камчатки было описано только для трех объектов: (1) высокомагнезиальные андезиты хребта Кумроч (Nishizawa et al., 2017) и (2) Шишейского комплекса (Bryant et al., 2011), а также (3) базальты извержения влк. Шивелуч 3600 ¹⁴С лет назад (Горбач, Портнягин, 2011). Однако каждый из этих объектов имеет существенные отличия от изученных образцов вулканов Харчинский и Заречный. В случае хребта Кумроч, обогащенный Ni оливин встречается только в высокомагнезиальных андезитах и не встречается в высокомагнезиальных базальтах, которые также были описаны в данной области (Nekrylov et al., 2022; Nishizawa et al., 2017). В Шишейском комплексе высоко-Ni оливин был описан только в магнезиальных андезитах (Bryant et al., 2011). Извержение влк. Шивелуч 3600 ¹⁴С лет назад представлено *Ol-Amp-Cpx-Phl* высококалиевыми базальтами (Волынец и др., 1997), тогда как образцы с высоконикелистым оливином вулканов Харчинский и Заречный относятся к умеренно-калиевой серии.

Для высокомагнезиальных оливинов вулканов Харчинский и Заречный характерны повышенные значения Fe/Mn (рис. 6в), что является даже более весомым свидетельством вовлечения пироксенитового источника в магомгенерацию, чем содержание никеля в оливине (Sobolev et al., 2007; Herzberg, 2011). Они характерны для образцов, обогащенных Ni — 7403-1, 7423-1 и 7424-1 для влк. Харчинский, и K2-94 и 7413 для влк. Заречный. Проявление этих двух маркеров в одних и тех же образцах говорит о том, что вклад пироксенитового источника в их образование почти не вызывает сомнений. Вместе с тем оливины двух образцов из группы моногенных конусов (обр. K2-81 и K2-83А) также отличаются более высокими значениями Fe/Mn от других оливинов состава Fo_{80-82} (рис. 6в). При этом они не имеют повышенного

содержания Ni, но для более железистого оливина содержание данного элемента определяется, главным образом, особенностями эволюции магмы — смешением с более дифференцированными расплавами и кристаллизацией ликвидусных Ni-содержащих минералов (*Ol*, *Cpx*) в разных порциях (например, Straub et al., 2008; Herzberg et al., 2013). Так, оливин обр. K2-81 характеризуется аномально низким содержанием Ni относительно оливина со схожей Mg# других изученных образцов ВВП Камчатки и MORB (рис. 6а). Вероятно, это связано с подчиненной ролью фракционирования клинопироксена в ходе эволюции его родоначального расплава относительно других образцов.

Пониженное содержание Ca в оливине также может являться свидетельством вклада пироксенитового источника (к примеру, Sobolev et al., 2007), но в случае островодужных магм оно может быть обусловлено высоким содержанием воды в расплаве (Gavrilenko et al., 2016). Оливин изученных образцов демонстрирует характерное “островодужное” обеднение по содержанию Ca относительно оливина MORB, однако между отдельными группами образцов заметны существенные различия в содержании этого компонента (рис. 6б). Для наиболее магнезиального оливина характерна обратная зависимость его обеднения по содержанию Ca с обогащением по концентрации Ni (рис. 9). Такая зависимость может свидетельствовать о том, что различия в стартовом содержании Ca между изученными образцами, в первую очередь, связаны с различиями в минералогических особенностях источников, а не с содержанием воды в родоначальных расплавах.

На основании соотношений Ca/Fe и Ni/Mg в оливине изученные образцы можно разделить на два основных тренда эволюции, стартовые точки которых, вероятнее всего, определяются различием источников расплавов (рис. 9). К первому тренду эволюции состава оливина относится большая часть образцов влк. Харчинский и часть образцов моногенных конусов с повышенным стартовым содержанием Ca и низкой концентрацией Ni, что характерно для перидотитового источника. Второй тренд выделяется для двух образцов 7423-1 и 7424-1 влк. Харчинский, имеющих наименьшее стартовое содержание Ca и наибольшую концентрацию Ni (рис. 9), что интерпретируется нами как тренд эволюции состава оливина, кристаллизующегося из расплавов преимущественно пироксенитового источника. Состав оливина всех образцов влк. Заречный и части образцов моногенных конусов (обр. K2-83А и K2-85) характеризуется промежуточным положением между двумя трендами эволюции (рис. 9), что может говорить о смешанном перидотит-пироксенитовом источнике расплавов для этих пород.

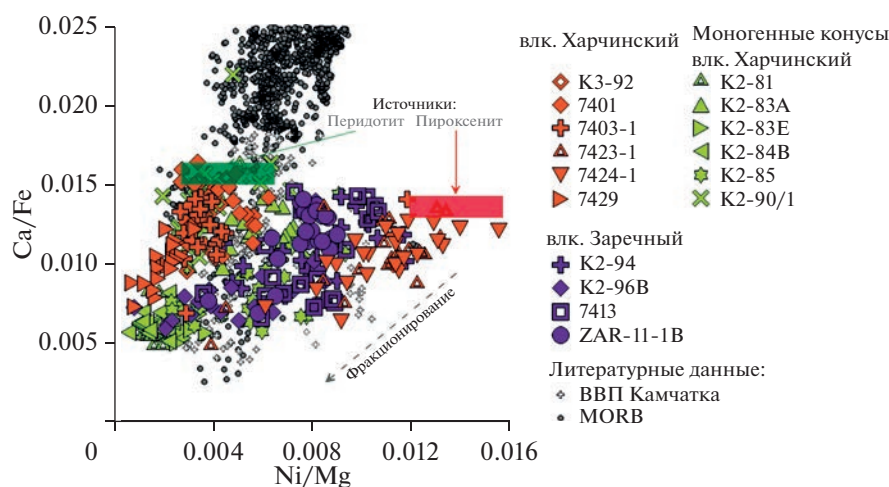


Рис. 9. Соотношения Ca/Fe и Ni/Mg в оливине изученных пород. Состав оливина базальтов срединно-океанических хребтов показан в соответствии с работой (Sobolev et al., 2007), состав оливина других вулканов Камчатки – (Nekrylov et al., 2022).

Высоко-К породы вулкана Харчинский

Происхождение высоко-К *Amp ± Ol ± Cpx ± Phl* базальтов и андезибазальтов влк. Харчинский вызывает отдельный интерес в силу их уникальной для современных вулканитов Камчатки геохимической специфики. Они характеризуются высокими абсолютными и относительными содержаниями легких редких земель (до 24 г/т La и до 57 г/т Ce, La/Yb до 15, La/Nb до 13.5), Sr (до 1240 г/т, Sr/Y до 68), Ba (до 1300 г/т, Ba/Nb до 680), Th и U (до 4.8 и 2.4 г/т, соответственно). Средние значения La/Yb (4.33 ± 0.6), La/Nb (4.47 ± 0.52), Sr/Y (28.5 ± 4.7) и Ba/Nb (237 ± 62) для изученных пород вулканов Харчинский и Заречный близки к таковым для других четвертичных вулканитов Камчатки (4.05 ± 2.1 , 3.54 ± 0.89 , 16.8 ± 7.7 и 166 ± 96 , соответственно, по базе данных GEOROC). Еще одной важной особенностью высоко-К пород влк. Харчинский является то, что именно эти породы содержат множество коровых и мантийных ксенолитов (Секисова и др., 2021; Siegrist et al., 2019, 2021).

К сожалению, нам не удалось измерить состав оливина этих пород (в силу его малого количества и плохой сохранности) для оценки вклада пироксенитового источника в их образование. Однако полученных нами и опубликованных ранее данных о геохимических особенностях достаточно для того, чтобы выявить наиболее вероятный сценарий их происхождения. В работе (Siegrist et al., 2019) был опубликован состав вмещающих ксенолиты пород влк. Харчинский, которые имеют идентичные геохимические особенности с изученными нами высоко-К породами. Помимо содержаний рассеянных элементов, в (Siegrist et al., 2019) приведены также изотопные характери-

сти этих пород ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.703598 \pm 5$ (погрешность указана для последней значащей цифры изотопного отношения, согласно опубликованным данным), $\epsilon_{\text{Nd}} = 9.7$, $\epsilon_{\text{Hf}} = 15.6$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.2734 \pm 5$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.4731 \pm 4$ и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.838 \pm 1$), которые имеют некоторые отличия по $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, ϵ_{Nd} и ϵ_{Hf} от изотопных характеристик прочих лав влк. Харчинский ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ от 0.703454 до 0.70353, ϵ_{Nd} от 9.2 до 9.3, ϵ_{Hf} от 14.8 до 15.4, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ от 18.2374 до 18.2755, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ от 15.4591 до 15.4846 и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ от 37.811 до 37.905). Данный факт говорит о том, что в образовании высоко-К пород принимает участие дополнительный источник вещества, по изотопным отношениям Nd и Hf более обедненный по сравнению с другими породами, несмотря на очевидное обогащение этими элементами в составе высоко-К пород (рис. 5). Отношение изотопов стронция, напротив, несколько более радиогенное по сравнению с другими изученными вулканами.

Повышенные значения Sr/Y и La/Yb традиционно рассматриваются как характерные признаки адакитов — предполагаемых продуктов плавления субдущированной океанической коры (например, Defant, Drummond, 1990). Изначально адакитами было принято считать породы среднего состава ($\text{SiO}_2 \geq 56$ мас. %; $\text{Sr} \geq 400$ г/т; $\text{Y} \leq 18$ г/т; $\text{Yb} \leq 1.9$ г/т; $\text{Sr/Y} \geq 40$; $\text{La/Yb} \geq 20$; Defant, Drummond, 1990). Однако впоследствии интервал возможного состава адакитов был расширен (Martin, 1999). В случае высоко-К *Amp ± Ol ± Cpx ± Phl* базальтов и андезибазальтов влк. Харчинский речь может идти о низкокремнистых адакитах, образованных плавлением перидотитов мантийного клина, которые до этого были подвержены взаимодействию с кислыми расплавами субдущированной океанической

коры (Martin et al., 2005; Moyen, 2009). Вклад расплавов субдущированной океанической коры в магмогенерацию под влк. Харчинский согласуется со множеством других косвенных свидетельств плавления краевой части Тихоокеанской плиты, субдущирующей под северным участком Центральной Камчатской депрессии (Волынец и др., 2000; Yagodinski et al., 2001; Churikova et al., 2001; Münker et al., 2004; Portnyagin et al., 2007; Nekrylov et al., 2018). В этом случае можно предполагать, что необычный изотопный состав высоко-К базальтов влк. Харчинский может быть связан именно с большим вкладом деплетированного в отношении изотопов Nd и Hf и обогащенного радиоактивным изотопом Sr материала гидротермально-измененной Тихоокеанской океанической плиты.

Признаки смешения магм в лавах вулканов Харчинский и Заречный

Широкий интервал составов вкрапленников оливина и клинопироксена (от 70.4 до 92.6 мол. % и от 72.6 до 91 мол. %, соответственно), серийно-порфировая структура пород, наличие гломеро-порфировых сростков и зональных кристаллов клинопироксена (рис. 3) и особенности валового состава пород (рис. 4) указывают на значимую роль процессов кумуляции кристаллов и смешения магм наряду с процессами фракционной кристаллизации при эволюции магм вулканов Харчинский и Заречный в коровых условиях.

Большая часть отличий в трендах изменения содержания Ni в оливине (рис. 6а) объясняется его различными стартовыми концентрациями (рис. 9), однако в некоторых образцах K2-85, K294, 7424-1, 7413 часть кристаллов выделяется из общих трендов обеднения содержанием Ni при понижении магнезиальности оливина. Данная особенность может свидетельствовать (1) о различных пропорциях ликвидусных минералов при эволюции магм или (2) о существенном влиянии процессов смешения на магматическую эволюцию данных образцов. В первом случае необходимо предполагать совместную кристаллизацию $Ol + Crx$, которая должна приводить к менее быстрому обеднению Ni при падении его магнезиальности по сравнению с кристаллизацией одного лишь Ol (к примеру, Herzberg et al., 2013). Данный механизм мог бы объяснить разницу между наблюдаемыми трендами, однако мы не видим существенной разницы между породами изученных вулканов ни в содержании Crx , ни в координатах $MgO-Al_2O_3/CaO$, которые хорошо отражают фракционирование Crx (рис. 2г). Единственным признаком, который может указывать на более раннее начало кристаллизации Crx в магмах влк. Заречный, является состав вкрапленников Crx в обр. ZAR-11-1B (рис. 7). Относительно Crx других образцов вулканов Харчинский и Заречный эти вкрапленники обеднены

CaO и обогащены Na_2O , что может говорить о существенно более высоких температурах и давлениях их кристаллизации, соответственно (Lindsley, 1983; Nimis, Ulmer, 1998).

Смешение примитивных магм с более дифференцированными расплавами также может хорошо объяснять особенности поведения Ni в оливине образцов влк. Заречный, так как фракционная кристаллизация оливина из базальтовой магмы обычно приводит к быстрому обеднению расплава Ni и, соответственно, к резкому понижению его концентрации в равновесном оливине. При смешении примитивного и дифференцированного расплавы гибридные магмы имеют более высокое содержание Ni при тех же значениях магнезиальности, а оливины, кристаллизующиеся из гибридных магм, характеризуются повышенным содержанием никеля (Straub et al., 2008; Gordeychik et al., 2020).

Амп-андезиты влк. Заречный по $Mg\# = 60-61$ мол. % близки магнезиальным андезитам влк. Шивелуч (рис. 4а), в образовании которых смешение примитивных и малоглубинных дифференцированных магм играло значимую роль (Горбач, Портнягин, 2011). На диаграмме $MgO-TiO_2$ (рис. 4в) составы андезитов влк. Заречный также следуют тренду смешения между примитивными и дифференцированными магмами. Среди пород влк. Шивелуч наиболее близкими петрографически аналогами андезитов влк. Заречный являются породы экструзий Красная и Шероховатая на его западных склонах. В породах данных экструзий, так же как в андезитах влк. Заречный, амфибол с реликтами оливина и клинопироксена в ядрах является преобладающим типом вкрапленников, плагиоклаз представлен в подчиненном количестве, а для основной массы типичны выделения кристобалита (Горбач, Портнягин, 2011). Петрографическое сходство андезитов влк. Заречный и экструзий западных склонов влк. Шивелуч позволяет предполагать близкие условия их образования. В работе (Симакин и др., 2019) показано, в отличие от малоглубинных продуктов современных извержений влк. Шивелуч, андезиты экструзий на его западных склонах могли кристаллизоваться в условиях нижней коры вплоть до переходной зоны кора-мантия. В данных условиях процессы сопряженных ассимиляции и фракционной кристаллизации также могли участвовать в формировании андезитов влк. Заречный, как это предполагалось ранее в работе (Волынец и др., 1999).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены новые данные по геохимии пород и составу минералов для представительной коллекции образцов пород вулканов Харчинский, Заречный и зоны моногенных конусов Харчинского озера. Большая часть изученных пород представ-

лена базальтами и андезибазальтами умеренно-К серии с магнезиальностью от 75 до 52 мол. % и типичным для островодужных лав обогащением крупноионными литофильными, легкими редкоземельными элементами и обеднением высокозарядными элементами и тяжелыми редкими землями. Высоко-К $Amp \pm Ol \pm Cpx \pm Phl$ базальты и андезибазальты, слагающие дайки в центре постройки влк. Харчинский, обнаруживают аномальное обогащение Ba, Th, U, Sr и LREE по сравнению не только с другими разностями пород вулканов Харчинский и Заречный, но и по отношению к продуктам извержений других четвертичных вулканов ВВП (до 24 г/т La и до 57 г/т Ce, La/Yb до 15, La/Nb до 13.5), Sr (до 1240 г/т, Sr/Y до 68), Ba (до 1300 г/т, Ba/Nb до 680), Th и U (до 4.8 и 2.4 г/т, соответственно). Такие особенности состава близки к низкремнистым адакитам, образование которых обычно связывают с плавлением перидотитов мантийного клина, метасоматизированных расплавами субдуцируемой океанической коры.

2. Базальты и андезибазальты вулканов Харчинский и Заречный содержат высоко-Mg фенокристаллы оливина (до $Fo_{92.6}$) и клинопироксена ($Mg\#$ до 91 мол. %). Породы демонстрируют петрографические и геохимические признаки фракционной кристаллизации, наряду с процессами кумуляции минералов и смешения магм. Эти признаки проявлены в особенностях валового состава пород (обогащение Mg, Sr и Ni, линейные и рассеянные тренды отдельных компонентов по отношению к SiO_2 и MgO) и в их петрографических особенностях (серийно-порфировая структура, наличие гломеропорфировых сростков и кристаллов клинопироксена с ритмичной зональностью). Кроме того, в базальтах влк. Заречный обнаружены ксеногенные кристаллы Srx , которые по содержаниям Na и Sr близки клинопироксену из ксенолитов пироксенитов и являются продуктами их дезинтеграции.

3. Вкрапленники оливина изученных пород характеризуются сложным распределением содержания никеля, кальция и величины Fe/Mn, что обусловлено минералогической гетерогенностью магматических источников. Оливин большинства образцов по содержанию Ni и величине Fe/Mn отвечает оливину, кристаллизующемуся из расплавов перидотитового источника. В то же время ряд образцов влк. Харчинский содержит высоко-Mg кристаллы оливина с аномально высокой концентрацией никеля (до 5000 г/т) и значением Fe/Mn до 80, что интерпретировано нами как свидетельство вклада пироксенитового источника. Использование соотношений Ca/Fe и Ni/Mg позволило разделить изученные оливины на два основных тренда эволюции, связанных с различными источниками расплавов — перидотитовым (повышенное содержание Ca и относительно по-

ниженное Ni в оливине большинства образцов влк. Харчинский и моногенных конусов) и пироксенитового (пониженное содержание Ca и аномально высокое (до 5000 г/т) содержание Ni) в оливине отдельных образцов влк. Харчинский. Состав оливина всех образцов влк. Заречный и части образцов моногенных конусов занимает промежуточное положение между двумя трендами эволюции, что указывает на гибридный перидотит-пироксенитовый источник расплавов для этих пород.

Полученные данные предоставляют новые свидетельства плавления краевой части субдуцирующей Тихоокеанской плиты под северным участком Центральной Камчатской депрессии и свидетельствуют о значительной гетерогенности мантии в этом районе.

Благодарности. Авторы благодарны О.А. Хлебородовой за подготовку образцов для химических анализов, проведение высокотемпературного плавления порошков пород и выполнение анализов на электронном зонде. Полевые работы по опробованию основания влк. Заречный и побочных конусов влк. Харчинский проводились в рамках российско-германского проекта КОМЕКС-2 при участии Н.Л. Миронова, А.Б. Белоусова и О.А. Хлебородовой. Авторы признательны С.З. Смирнову за конструктивные замечания, которые позволили лучше аргументировать отдельные выводы нашей работы и улучшить качество публикации.

Источники финансирования. Финансирование проекта КОМЕКС-2 осуществлялось Министерством науки и образования ФРГ. Работа была завершена в рамках темы НИР № 0282-2019-0004 Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Волынец О.Н., Пономарева В.В., Бабанский А.Д. Магнезиальные базальты андезитового вулкана Шивелуч // Петрология. 1997. Т. 5. № 2. С. 206–221.
- Волынец О.Н., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Ягодзински Дж.М. Харчинский и Заречный вулканы — уникальные центры позднеплейстоценовых магнезиальных базальтов на Камчатке: структурная приуроченность, морфология, возраст и геологическое строение вулканов // Вулканология и сейсмология. 1998. № 4–5. С. 5–18.
- Волынец О.Н., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Ягодзински Дж.М. Харчинский и Заречный вулканы — уникальные центры позднеплейстоценовых магнезиальных базальтов на Камчатке: вещественный состав вулканических пород // Вулканология и сейсмология. 1999. № 1. С. 31–45.
- Волынец О.Н., Бабанский А.Д., Гольцман Ю.В. Изотопные и геохимические вариации в лавах вулканов Северной группы (Камчатка) в связи с особенностями процесса субдукции // Геохимия. 2000. № 10. С. 1067–1084.
- Горбач Н.В., Портнягин М.В. Геологическое строение и петрология лавового комплекса вулкана Молодой

- Шивелуч (Камчатка) // Петрология. 2011. Т. 19. № 2. С. 140–172.
- Кутыев Ф.Ш., Эрлих Э.Н. К петрологии базальтов Харчинской группы вулканов // Бюлл. Вулканол. станций. 1973. № 49. С. 83–92.
- Меняйлов А.А. Вулканы Харчинских гор // Тр. Лаб. вулканологии. 1949. Вып. 6. С. 53–61.
- Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования // Под ред. Богатикова О.А., Петрова О.В., Шарпенко Л.Н. СПб.: Изд. ФГБУ “ВСЕГЕИ”, 2008. 203 с.
- Огородов Н.В., Белоусов В.И. Новые данные о вулканах Харчинском и Заречном // Бюлл. Вулканол. станций. 1961. № 31. С. 46–51.
- Портнягин М.В., Миронов Н.Л., Назарова Д.П. Распределение меди между оливином и расплавленными включениями и ее содержание в примитивных островодужных магмах Камчатки // Петрология. 2017. Т. 25. № 4. С. 419–432.
- Секисова В.С., Смирнов С.З., Кузьмин Д.В. и др. Коровомантийные ксенолиты: минералогия и петрогенезис // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 3. С. 422–442.
- Симакин А.Г., Девятова В.Н., Салова Т.П., Шапошникова О.Ю. Экспериментальное исследование кристаллизации амфибола из высокомагнезильного андезитового расплава вулкана Шивелуч // Петрология. 2019. Т. 27. № 5. С. 476–495.
- Bryant J.A., Yogodzinski G.M., Churikova T.G. High-Mg# andesitic lavas of the Shisheisky Complex, Northern Kamchatka: implications for primitive calc-alkaline magmatism // Contrib. Mineral. Petrol. 2011. V. 161. Iss. 5. P. 791–810.
- Churikova T., Dorendorf F., Wörner G. Sources and fluids in the mantle wedge below Kamchatka, evidence from across-arc geochemical variation // J. Petrol. 2001. V. 42. Iss. 8. P. 1567–1593.
- Defant M.J., Drummond M.S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere // Nature. 1990. V. 347. P. 662–665.
- Gavrilenko M., Herzberg C., Vidito C. et al. A calcium-in-olivine geohygrometer and its application to subduction zone magmatism // J. Petrol. 2016. V. 57. Iss. 9. P. 1811–1832.
- Gill R. Igneous rocks and processes: a practical guide. United Kingdom: John Wiley & Sons, 2011. 438 p.
- Gorbach N., Portnyagin M., Tembrel I. Volcanic structure and composition of Old Shiveluch volcano, Kamchatka // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2013. V. 263. P. 193–208.
- Gorbach N., Filosofova T., Portnyagin M. Amphibole record of the 1964 plinian and following dome-forming eruptions of Shiveluch volcano, Kamchatka // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2020. V. 407. 107108.
- Gordeychik B., Churikova T., Shea T. et al. Fe and Ni relations in olivine differentiate between crystallization and diffusion trends // J. Petrol. 2020. V. 61. Iss. 9. <https://doi.org/10.1093/petrology/egaa083>
- Govindaraju K. Compilation of working values and sample description for 383 geostandards // Geostand. Newslett. 1994. V. 18. P. 1–158.
- Herzberg C. Identification of source lithology in the Hawaiian and Canary Islands: implications for origins // J. Petrol. 2011. V. 52. Iss. 1. P. 113–146.
- Herzberg C., Asimow P.D., Ionov D.A. et al. Nickel and helium evidence for melt above the core-mantle boundary // Nature. 2013. V. 493. Iss. 7432. P. 393–397.
- Jarosewich E., Nelen J.A., Norberg J.A. Reference samples for electron microprobe analysis // Geostand. Newslett. 1980. V. 4. P. 43–47.
- Jochum K.P., Weis U., Schwager B. et al. Reference values following ISO guidelines for frequently requested rock reference materials // Geostand. Geoanalytical Res. 2016. V. 40. Iss. 3. P. 333–350.
- Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S. et al. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the mineralogical association // Mineral. Mag. 1997. V. 61. Iss. 3. P. 295–321.
- Lindsley D.H. Pyroxene thermometry // Amer. Mineral. 1983. V. 68. Iss. 5–6. P. 477–493.
- Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids // Lithos. 1999. V. 46. № 3. P. 411–429.
- Martin H., Smithies R.H., Rapp R. et al. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution // Lithos. 2005. V. 79. № 1–2. P. 1–24.
- Moyen J.F. High Sr/Y and La/Yb ratios: the meaning of the “adakitic signature” // Lithos. 2009. V. 112. № 3–4. P. 556–574.
- Münker C., Wörner G., Yogodzinski G.M., Churikova T. Behaviour of high field strength elements in subduction zones: constraints from Kamchatka-Aleutian arc lavas // Earth Planet. Sci. Lett. 2004. № 224. P. 275–293.
- Nekrylov N., Portnyagin M.V., Kamenetsky V.S. et al. Chromium spinel in Late Quaternary volcanic rocks from Kamchatka: implications for spatial compositional variability of subarc mantle and its oxidation state // Lithos. 2018. V. 322. P. 212–224.
- Nekrylov N., Kamenetsky V.S., Savelyev D.P. et al. Platinum-group elements in Late Quaternary high-Mg basalts of eastern Kamchatka: evidence for minor cryptic sulfide fractionation in primitive arc magmas // Lithos. 2022. Iss. 412–413. 106608.
- Nimis P., Ulmer P. Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks Part 1: An expanded structural geobarometer for anhydrous and hydrous, basic and ultrabasic systems // Contrib. Mineral. Petrol. 1998. V. 133. Iss. 1. P. 122–135.
- Nishizawa T., Nakamura H., Churikova T. et al. Genesis of ultra-high-Ni olivine in high-Mg andesite lava triggered by seamount subduction // Sci. Reports. 2017. V. 7. Iss. 1. 11515.
- Nikulin A., Levin V., Carr M. et al. Evidence for two upper mantle sources driving volcanism in Central Kamchatka // Earth Planet. Sci. Lett. 2012. V. 321–322. P. 14–19.
- Ponomareva V., Pendea I.F., Zelenin E. et al. The first continuous late Pleistocene tephra record from Kamchatka Peninsula (NW Pacific) and its volcanological and paleogeographic implications // Quaternary Sci. Rev. 2021. V. 257. 106838. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106838>
- Portnyagin M., Bindeman I., Hoernle K., Hauff F. Geochemistry of primitive lavas of the Central Kamchatka Depression: magma generation at the edge of the Pacific Plate // Eds. J. Eichelberger, E. Gordeev, M. Kasahara et al. Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region. Vol.

- Geophysical Monograph 172. Amer. Geophys. Union, Washington D.C. 2007. P. 199–239.
- Portnyagin M.V., Sobolev A.V., Mironov N.L., Hoernle K. Pyroxenite melts involved in magma genesis in Kamchatka // 19th Annual VM Goldschmidt Conference, Davos, Switzerland, June 21–26. Geochim. Cosmochim. Acta. 2009. V. 73. Iss. 13. Suppl. 1. A1044.
- Siegrist M., Yogodzinski G., Bizimis M. et al. Fragments of metasomatized forearc: origin and implications of mafic and ultramafic xenoliths from Kharchinsky Volcano, Kamchatka // Geochim. Geophys. Geosys. 2019. Iss. 9. P. 4426–4456.
- Siegrist M., Yogodzinski G.M., Bizimis M. Origins of Os-isotope and platinum-group element compositions of metasomatized peridotite and cumulate pyroxenite xenoliths from Kharchinsky Volcano, Kamchatka // Geochim. Cosmochim. Acta. 2021. V. 299. P. 130–150.
- Sobolev A.V., Hofmann A.W., Kuzmin D.V. et al. The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts // Science. 2007. V. 316. Iss. 5823. P. 412–417.
- Straub S.M., LaGatta A.B., Pozzo A.L.M.D., Langmuir C.H. Evidence from high-Ni olivines for a hybridized peridotite/pyroxenite source for orogenic andesites from the central Mexican Volcanic Belt // Geochim. Geophys. Geosys. 2008. Iss. 9. <https://doi.org/10.1029/2007GC001583>
- Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geol. Soc. London, Spec. Publ. 1989. V. 42. Iss. 1. P. 313–345.
- Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // Amer. Mineral. 2010. V. 95. Iss. 1. P. 185–187.
- Yogodzinski G.M., Lees J.M., Churikova T.G. et al. Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges // Nature. 2001. V. 409. P. 500–504.

New Data on the Rock and Mineral Composition of Kharchinsky and Zarechny Volcanoes (Central Kamchatka depression): Heterogeneity of the Mantle Source and Peculiarities of Magma Evolution in Crust

N. V. Gorbach¹, N. A. Nekrylov^{1, 2}, M. V. Portnyagin³, and K. Hoernle^{3, 4}

¹ Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

² A.E. Fersman Mineralogical Museum, Moscow, Russia

³ GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, Kiel, Germany

⁴ Institute of Geosciences, Kiel University, Kiel, Germany

The Kharchinsky and Zarechny volcanoes and the Kharchinsky Lake zone of monogenetic cones are unique eruptive centers of magnesian lavas located above the northern margin of the Pacific Plate subducting beneath Kamchatka. This work presents new geochemical data on the composition of rocks (55 samples) and minerals (over 900 analyses of olivine, pyroxenes, amphibole, and plagioclase) of these centers analyzed by XRF and LA-ICP-MS (rocks) and electron microprobe (minerals). Most of the studied rocks are represented by magnesian (Mg# = 60–75 mol. %), medium-K basalts and basaltic andesites. Moderate-magnesian (Mg# = 52–59 mol. %) basaltic andesites are present among the monogenic cones of the Kharchinsky Lake. The rare rock varieties include high-K basalts-basaltic andesites of dikes in the center of the Kharchinsky volcano and magnesian andesites (Mg# = 58–61 mol. %) of the extrusions of Zarechny volcano. The distribution of trace element contents in these samples demonstrates the enrichment of large-ion lithophile elements, light REEs and depletion of high field strength elements and heavy REEs typical of arc rocks. High-K basalts and basaltic andesites show anomalous enrichment in Ba (>1000 ppm), Th (>3.8 ppm), U (>1.8 ppm), Sr (>800 ppm, Sr/Y > 50) and light REE (La > 20 ppm); their compositions are close to those of low-Si adakites. Basalts and basaltic andesites contain high-Mg olivine phenocrysts (up to Fo_{92.6}) and clinopyroxene (Mg# up to 91 mol. %). The rocks show petrographic and geochemical signs of fractional crystallization along with the processes of mineral accumulation and magma mixing. Some of the olivine phenocrysts show high NiO contents (up to 5000 ppm) and elevated Fe/Mn ratio (up to 80), interpreted as evidence of participation of the pyroxenite source in the magma generation processes. The use of Ca/Fe and Ni/Mg ratios allowed us to distinguish the composition fields and evolution trends of olivines associated with different sources – peridotite and pyroxenite, formed by the reaction of mantle wedge peridotites and high-Si melts of the subducted oceanic crust. The new data are consistent with other evidence of melting of the subducted Pacific plate edge beneath the northern part of the Central Kamchatka depression at the Kurile-Kamchatka and Aleutian subduction zone junction and testify to significant heterogeneity of the mantle in this area.

Keywords: arc magmas, olivine, clinopyroxene, pyroxenite magma source, Kharchinsky, Zarechny, Kamchatka