

СОСТАВ И ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СПЕЦИФИКА МАГМАТИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ КАМЧАТКИ ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ И ЗАКАЛОЧНЫХ СТЕКОЛ ПОРОД

© 2020 г. В. Б. Наумов^а, *, В. А. Дорофеева^а, М. Л. Толстых^а, А. В. Гирнис^б, **, В. В. Ярмолюк^б

^аИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,
ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

^бИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

*e-mail: naumov@geokhi.ru

**e-mail: girnis@igem.ru

Поступила в редакцию 26.02.2019 г.

После доработки 21.05.2019 г.

Принята к публикации 21.05.2019 г.

На основе созданной нами и постоянно пополняемой базы данных, включающей на конец 2018 г. более 1900000 определений по 75 элементам в расплавных включениях и в закалочных стеклах пород, оценены средние содержания летучих, петрогенных и редких элементов в магматических расплавах Камчатки. Полученные содержания сопоставлены с соответствующими характеристиками расплавов островных дуг и активных континентальных окраин. Распределение содержаний SiO₂ (более 105000 определений) в природных магматических расплавах всех геодинамических обстановок отчетливо бимодальное с двумя максимумами при SiO₂ = 50–52 и 72–76 мас. %. Построены бинарные диаграммы, отражающие средние содержания петрогенных, летучих, редких и редкоземельных элементов, а также спайдер-диаграммы, отражающие соотношения средних содержаний элементов в магматических расплавах. В результате выявлена определенная специфика расплавов Камчатки. В частности, повышенные отношения Ba/Nb в основных камчатских расплавах по сравнению с расплавами других субдукционных зон, возможно, отражают высокий вклад субдукционного материала при образовании базальтов Камчатки, а дефицит Th может определяться особенностями флюидного режима.

Ключевые слова: Камчатка, расплавные включения, закалочные стекла, летучие компоненты, редкие элементы, геодинамические обстановки

DOI: 10.31857/S0016752520030097

Камчатский полуостров – часть Курило-Камчатской островной дуги (ККОД), расположенной в северо-западной части сочленения Евразийской и Тихоокеанской плит. Эта островная дуга – типичный вулканический пояс, образовавшийся вследствие субдукции Тихоокеанской плиты под Евразийскую. Территория Камчатки тектонически неоднородна. Южная ее часть (до широты Малко-Петропавловской зоны поперечных дислокаций) считается продолжением Курильской ветви ККОД. В северной части Камчатки расположена Берингийская зона трансформных разломов, приуроченных к границе Тихоокеанской плиты и Берингийского блока Северо-Американской плиты (Yogdzinski, 2001 и др.).

В центральной части Камчатки присутствуют все элементы классической островной дуги: вулканическая дуга (в миоцене – Срединный хребет,

позднее – Восточный вулканический фронт и Центральная-Камчатская депрессия), преддуговой (внутренний) склон глубоководного желоба, глубоководный желоб, внешний склон желоба. Глубоководный желоб является поверхностным отражением зоны субдукции, фиксирующим место, где Тихоокеанская плита поддвигается под Евразийскую; скорость субдукции составляет около 8 см/г (Стеблов и др., 2010). По распределению гипоцентров землетрясений четко вырисовывается глубинная сейсмофокальная зона, которая прослеживается на глубину до 650 км и имеет наклон в среднем 40° (Селиверстов, 2009). Мощность земной коры на Камчатке по данным глубинного сейсмического зондирования (Балеста, 1991) изменяется от 20 до 42 км, увеличиваясь с юга на север. Вкrest простираения дуги, на широте Ключевской группы вулканов, ее мощность меняется с запада на восток от 30 км под Средин-

ным хребтом до 40–42 км под Центральной Камчатской Депрессией. Мощность континентального блока коры делает возможным сравнение Камчатки с активными окраинами андийского типа. Таким образом, Камчатка несет в себе черты, как островной дуги, так и активной континентальной окраины.

Камчатский полуостров – один из наиболее активных вулканических регионов Земли. Он включает более 200 четвертичных вулканов, 29 из которых активны до настоящего времени (Действующие вулканы Камчатки, 1991). На Южной Камчатке (и Курилах) вулканизм проявляется при стационарном режиме субдукции, установившемся в миоцене, и представлен типичными островодужными магмами (Авдейко, 2006). На центральной и северной Камчатке четвертичный вулканизм проявлен в трех зонах, параллельных глубоководному желобу: вулканический пояс Восточной Камчатки, в котором выделяются Восточный вулканический Фронт и Центральная Камчатская депрессия (Пономарева и др., 2008) и (3) тыловая вулканическая зона, представленная Срединным хребтом.

На основе анализа особенностей структурно-вещественной зональности вулканогенных комплексов для этих зон Камчатки реконструированы следующие условия магмообразования (Авдейко, 2006): вулканическую дугу Срединного хребта Камчатки характеризует постсубдукционный этап эволюции, вулканическая дуга Восточной Камчатки приурочена к новой активной субдукционной зоне, заложенной в конце миоцена.

Выявлению источников и изучению процессов магмогенерации на Камчатке посвящено множество работ (Volynets, 1994; Churikova et al., 2001; Volynets et al., 2010; Portnyagin et al., 2005, 2007; Nekrylov et al., 2018; и другие). Согласно современным представлениям о надсубдукционных зонах, в образовании магм могут участвовать следующие компоненты: мантия обедненная (например, MORB-типа) и обогащенная (OIB-типа); субдуцированные осадки и частичные выплавки погружающейся плиты (так называемый “адакитовый компонент”); флюид, образованный вследствие дегидратации субдуцируемой океанической плиты, а также вещество коры (Sun, McDonough, 1989; McCulloch, Gamble, 1991; Pearce, Parkinson, 1993; Yagodinsky et al., 2001 и многие другие). Гетерогенность вулканитов также может быть обусловлена различной степенью плавления вещества.

В связи со сложной историей и структурой Камчатки, можно предположить, что в ее магматизме могут проявляться особенности различных геодинамических обстановок. В частности, для этого региона могут наблюдаться переходы от типичной островной дуги к активной континентальной окраине (Перепелов и др., 2006, Федоров

и др., 2008). Для проверки этого предположения мы провели сравнение средних составов расплавов камчатских вулканов с соответствующими характеристиками расплавов субдукционных обстановок. Это позволило выявить некоторую специфику расплавов Камчатки по сравнению с другими геодинамическими обстановками. Список вулканов и вулканических центров Камчатки, в публикациях о которых имеются результаты анализов расплавных включений и закалочных стекол пород, приведен в табл. 1.

ХАРАКТЕРИСТИКА БАЗЫ ДАННЫХ

Общее количество публикаций в нашей базе данных по расплавным включениям в минералах и закалочным стеклам пород достигло 1770, количество определений (микрообъектов – расплавных включений и закалочных стекол) превысило 105000. В базу данных на конец 2018 г. занесено более 190000 определений по 75 элементам. Половина из этих определений приходится на расплавные включения, остальные – на закалочные стекла. Как и в наших предыдущих исследованиях (начиная с Наумов и др., 2004), в настоящей статье выделены следующие геодинамические обстановки, различающиеся по условиям формирования и эволюции магматических расплавов: I – зоны спрединга океанических плит (срединно-океанические хребты); II – проявления мантийных плюмов в условиях океанических плит (океанические острова и лавовые плато); III и IV – обстановки, связанные с субдукционными процессами (III – зоны островодужного магматизма, IV – зоны магматизма активных континентальных окраин); V – внутриконтинентальные рифты и области континентальных горячих точек.

На рис. 1 представлены гистограммы распределения содержаний SiO_2 в гомогенных расплавных включениях в минералах и в стеклах вулканических пород всех геодинамических обстановок. На рис. 1а отражено такое распределение по 13500 определениям, полученным к 2004 г., приведенное в статье Наумова и др. (2004). В этой статье был отмечен бимодальный тип распределения имеющихся данных по природным магматическим расплавам. Рис. 1б построен по данным уже 33000 определений, на котором отражено распределение содержаний SiO_2 отдельно для гомогенных расплавных включений и для закалочных стекол вулканических пород (Наумов и др., 2010). На рис. 1в показано это распределение для всех доступных в литературе данных (105100). Отчетливо видна, во-первых, полная идентичность распределений, несмотря на то, что после 2004 г. в исследования было вовлечено большое количество новых природных объектов из различных геодинамических обстановок, и, во-вторых, бимодальность распределения содержаний SiO_2 в

Таблица 1. Вулканы и вулканические центры Камчатки, в публикациях о которых приведены данные о составе расплавных включений и закалочных стекол пород

Вулкан, вулканический центр	Литература	Вулкан, вулканический центр	Литература
Авачинский	1–13	Камчатский мыс	40, 41
Ахтанг	14	Карымский	42–51
Бакенинг	15	Ключевской	52–62
Банно-Карымшинский	16	Ксудач	63–67
Безымянный	17–19	Курильское озеро	68
Валагинский	20	Майницкая зона, Корякия	69
Восточная Камчатка	21	Мутновский	70–74
Гамчен	22	Начикинский	75
Горелый	23–27	Паужетка	76
Дикий Гребень	28, 29	Семячик	77
Жупановский	30	Толбачик	78–82
Заваринский	31, 32	Тумрок	83
Ильинский	33, 34	Узон-Гейзер	84
Ичинский	35–37	Фарафонова Падь	85
Камбальный	38	Хайрюзовский	86, 87
Камень	39	Шивелуч	88–93

Примечания. 1 – Портнягин и др., 2000; 2 – Колосков и др., 2001; 3 – Толстых и др., 2002; 4 – Портнягин и др., 2005; 5 – Matveev et al., 2005; 6, 15, 25, 33, 48, 58, 64, 72, 74, 78, 85 – Portnyagin et al., 2007; 7 – Ishimaru et al., 2007; 8 – Ishimaru, Arai, 2009; 9 – Ionov et al., 2011; 10 – Тимина и др., 2012; 11, 12 – Benard et al., 2016, 2017; 13 – Kobayashi et al., 2017; 14, 22, 35, 39, 57 – Churikova et al., 2007; 16 – Гриб и др., 2016; 17 – Толстых и др., 1999; 18 – Neill et al., 2010; 19 – Shcherbakov et al., 2011; 20 – Соболев и др., 1989; 21 – Kamenetsky et al., 1995; 23, 24, 71 – Хетчиков и др., 2000, 2001; 26 – Толстых и др., 2012; 27, 80 – Портнягин и др., 2017; 28 – Толстых и др., 2000; 29 – Хетчиков и др., 2000; 30 – Плечова и др., 2011; 31, 63, 70 – Фролова и др., 2001; 32, 34, 65 – Плечов и др., 2008; 36, 79 – Dobretsov et al., 2016; 37 – Толстых и др., 2019; 38 – Тетроева, Плечов, 2000; 40 – Портнягин и др., 2005; 41 – Portnyagin et al., 2008; 42 – Красов, Клоккятти, 1979; 43 – Бабанский и др., 1980; 44 – Толстых и др., 2001; 45 – Izbekov et al., 2004; 46 – Гриб, Леонов, 2004; 47, 77, 83 – Леонов, Гриб, 2004; 49 – Наумов и др., 2008; 50 – Портнягин и др., 2011; 51 – Edmonds, 2015; 52 – Sobolev, Chaussidon, 1996; 53 – Хубуная, Соболев, 1998; 54 – Миронов и др., 2000; 55 – Плечов и др., 2000; 56 – Хубуная и др., 2007; 59 – Auer et al., 2009; 60 – Миронов, Портнягин, 2011; 61 – Ponomareva et al., 2013; 62 – Mironov et al., 2015; 66 – Шишкина и др., 2009; 67 – Бурикова, Парфенова, 2013; 68 – Плечов и др., 2010; 69 – Злобин и др., 1990; 73 – Robertson et al., 2013; 74 – Shishkina et al., 2018; 76 – Ponomareva et al., 2018; 81 – Plechov et al., 2015; 82 – Kamenetsky et al., 2017; 83 – Каменецкий и др., 1992; 86 – Вавилов и др., 1984; 87 – Коваленко и др., 2017; 88 – Толстых и др., 1998; 89 – Tolstykh et al., 2000; 90 – Blundy et al., 2006; 91 – Humphreys et al., 2008; 92 – Толстых и др., 2015; 93 – Ponomareva et al., 2015.

природных магматических расплавах. Первый максимум определений приходится на содержания $\text{SiO}_2 = 50\text{--}52$ мас. %, а второй – на содержания $72\text{--}76$ мас. %, но на рис. 1в наблюдается небольшое увеличение количества определений при содержаниях SiO_2 в диапазоне $58\text{--}62$ мас. %. По-видимому, можно сделать вывод, что такой тип распределения содержаний SiO_2 в природных магматических расплавах Земли при дальнейших исследованиях уже не изменится.

Гистограммы на рис. 2 отражают распределение содержаний SiO_2 в магматических расплавах конкретных геодинамических обстановок (I–V и Камчатка). Отметим, что в данные по расплавам III обстановки (островные дуги) не включены результаты по расплавам Камчатки, которые представлены отдельно. В I обстановке (срединно-океанические хребты) практически отсутствуют расплавы среднего и кислого состава (в нашей ба-

зе из общего количества 15800 анализов таких всего 132, т.е. 0.8%). Во II обстановке (17400 определений по океаническим островам) также преобладают расплавы основного и ультраосновного составов. Для Камчатки и для III, IV, V обстановок (островные дуги, активные континентальные окраины и внутриплитные континентальные обстановки) характерен близкий тип распределения. В них представлены магматические расплавы с широкими вариациями содержаний SiO_2 – от 40 до 80 мас. %. Наибольшее количество определений получено для внутриплитных континентальных обстановок (23700), для островных дуг – 21200, для активных континентальных окраин – 13100, для Камчатки – 9600.

Учитывая такое распределение содержаний SiO_2 (рис. 2), средние содержания петрогенных, летучих, редких и редкоземельных элементов были подсчитаны нами для трех типов магматиче-

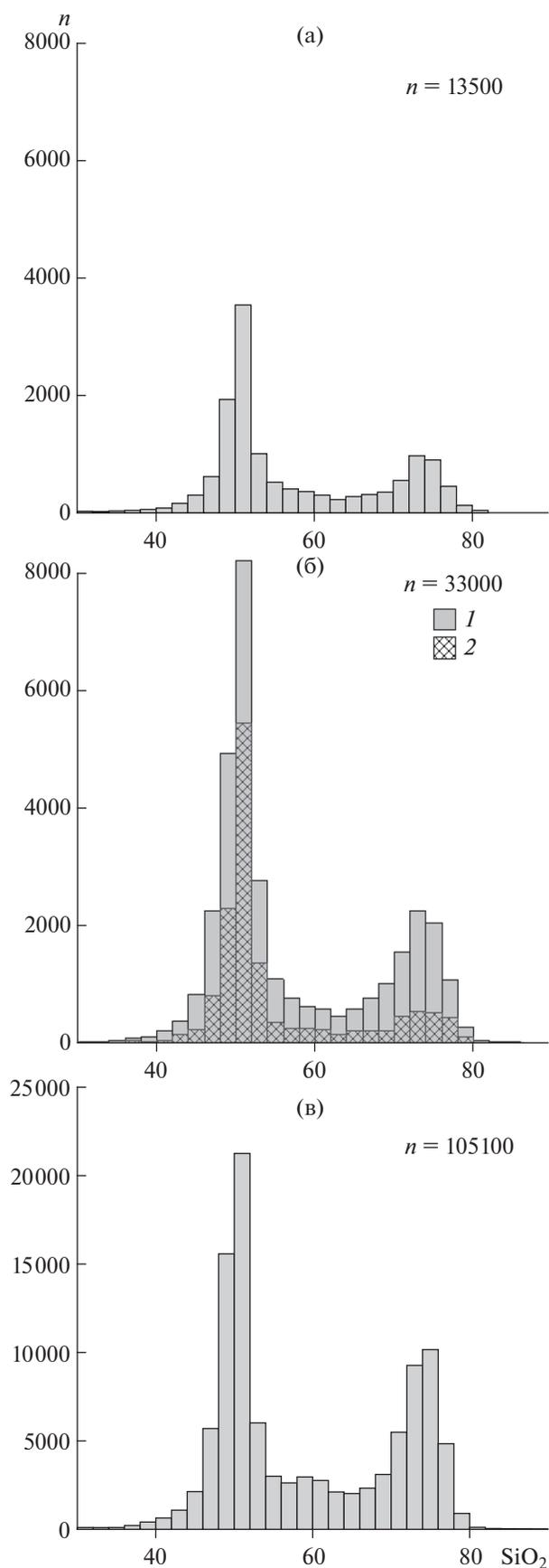


Рис. 1. Гистограммы распределения содержаний SiO₂ в природных магматических расплавах всех геодинамических обстановок по данным изучения гомогенных расплавных включений и закалочных стекол пород. n – количество определений; (а) – данные (Наумов и др., 2004); (б) – данные (Наумов и др., 2010), 1 – расплавные включения, 2 – закалочные стекла пород; (в) – данные настоящей работы.

ских расплавов: для расплавов основного состава (SiO₂ = 40–54 мас. %), для расплавов среднего состава (SiO₂ = 54–66 мас. %) и для расплавов кислого состава (SiO₂ > 66 мас. %). В наших предыдущих работах (Наумов и др., 2004, 2010, 2017) было показано, что средние геометрические значения предпочтительны по сравнению со средними арифметическими, поскольку распределение элементов близко к логнормальному. Средние геометрические содержания элементов рассчитывались при условии, что с вероятностью 95% величина отдельного определения не отклоняется от среднего значения более, чем на 2σ . Определения, которые не удовлетворяли этому условию, отбрасывались, а величина среднего значения вновь пересчитывалась. Для каждого значения среднего содержания приведены доверительные интервалы для 95% уровня достоверности: первая цифра – плюс к среднему, вторая цифра – минус от среднего. Полученные данные по средним содержаниям петрогенных, летучих и редких элементов в расплавах Камчатки, островных дуг (ОД) и активных континентальных окраин (АКО) представлены в табл. 2–4. На основе этих данных построены рисунки 3–6.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПЛАВОВ

По содержаниям петрогенных оксидов (рис. 3) расплавы вулканитов Камчатки, а также двух геодинамических обстановок, ОД и АКО, очень близки на всем интервале кремнекислотности. Однако в содержаниях летучих компонентов заметны определенные различия. Концентрации хлора в расплавах ОД существенно выше, чем в расплавах АКО и Камчатки, а концентрации фтора различаются во всех трех обстановках, причем с ростом кремнекислотности в расплавах Камчатки содержания фтора снижаются, в отличие от поведения этого элемента в расплавах двух других обстановок (рис. 3).

Редкие элементы и их соотношения также говорят о специфике Камчатки (особенно в сегменте расплавов кислого состава) при общем сходстве с расплавами ОД. Стоит отметить, что основные расплавы всех трех групп (Камчатки, ОД и АКО) чрезвычайно близки по таким показателям, как концентрации крупноионных, флюидмобильных и высокозарядных компонентов (рис. 4).

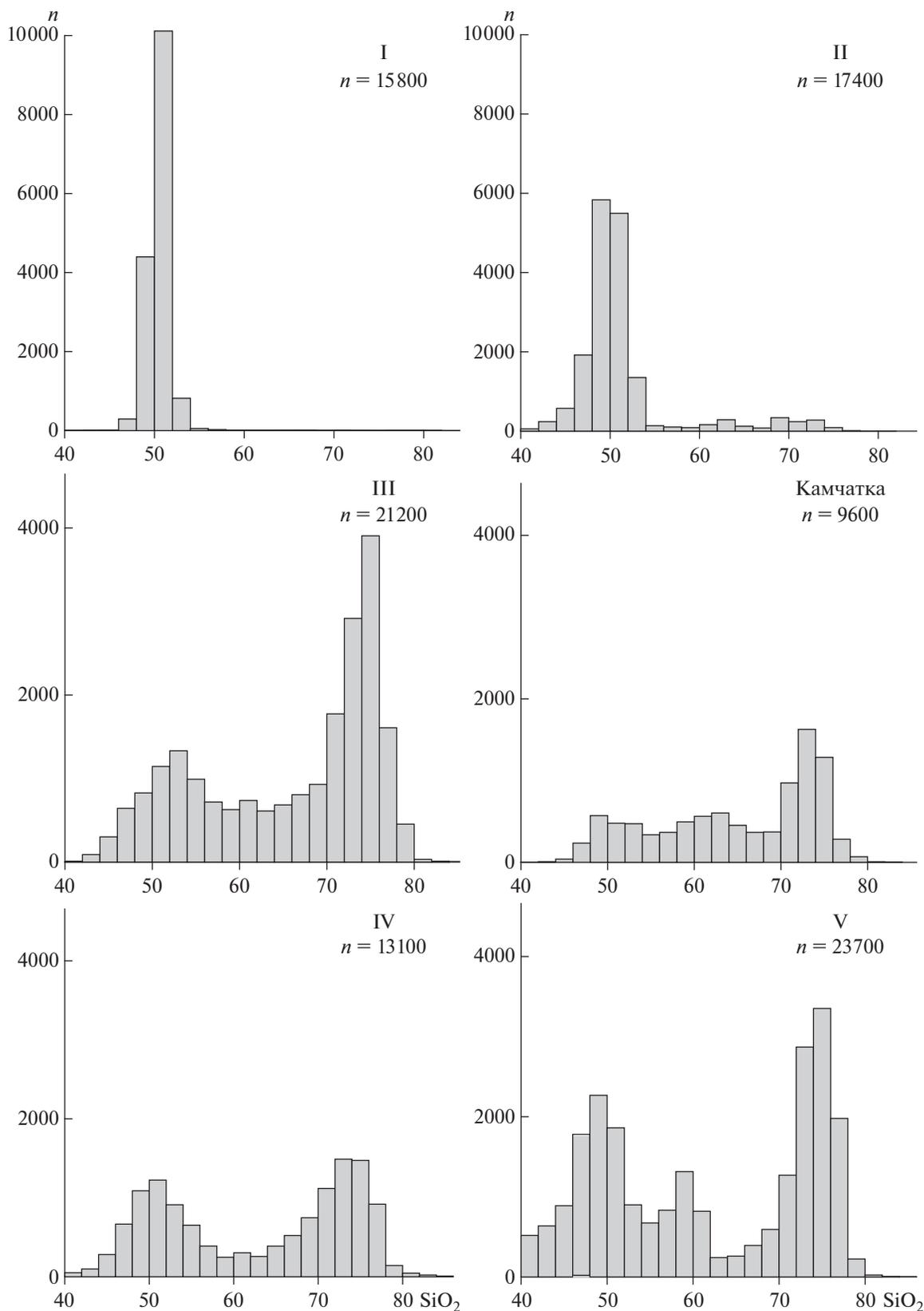


Рис. 2. Гистограммы распределения содержаний SiO₂ в природных магматических расплавах главных геодинамических обстановок (I–V) и Камчатки по данным изучения гомогенных расплавленных включений и закалочных стекол пород. *n* – количество определений; I – срединно-океанические хребты, II – океанические острова, III – островные дуги, IV – активные континентальные окраины, V – внутриконтинентальные рифты и области горячих точек.

Таблица 2. Среднее содержание петрогенных, летучих и редких элементов в магматических расплавах основного состава ($\text{SiO}_2 = 40\text{--}54$ мас. %) Камчатки, островных дуг (III) и активных континентальных окраин (IV) по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стекол вулканических пород

Компонент	Камчатка			III			IV		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
SiO_2	1731	50.42	+2.59/–2.46	4015	50.48	+3.15/–2.97	4093	49.95	+2.98/–2.81
TiO_2	1720	1.03	+0.44/–0.31	3806	0.93	+0.47/–0.31	3993	1.25	+0.60/–0.40
Al_2O_3	1709	16.49	+2.53/–2.20	3816	15.30	+2.64/–2.25	3997	16.69	+2.51/–2.18
FeO	1709	8.60	+2.62/–2.01	3820	9.75	+2.75/–2.15	4002	9.13	+2.55/–1.99
MnO	1669	0.15	+0.09/–0.06	3610	0.18	+0.10/–0.06	3875	0.16	+0.08/–0.05
MgO	1722	6.06	+3.94/–2.39	3910	6.28	+3.30/–2.16	3992	5.93	+3.05/–2.01
CaO	1708	10.23	+3.20/–2.44	3815	10.64	+2.84/–2.24	3994	9.79	+2.46/–1.96
Na_2O	1709	3.07	+0.94/–0.72	3815	2.28	+0.80/–0.59	3995	3.13	+1.14/–0.83
K_2O	1709	0.80	+0.47/–0.30	3900	0.65	+0.88/–0.37	3995	0.87	+0.77/–0.41
P_2O_5	1538	0.17	+0.13/–0.07	3207	0.16	+0.27/–0.10	3786	0.31	+0.46/–0.19
H_2O	554	1.79	+1.94/–0.93	1673	1.87	+1.52/–0.84	1378	2.02	+1.92/–0.99
Cl, ppm	1124	810	+470/–300	2343	1030	+1200/–550	3190	760	+890/–410
F	306	380	+300/–170	1031	330	+470/–190	963	700	+610/–330
S	1126	1470	+1180/–660	1838	910	+1490/–560	3043	1040	+1410/–600
CO_2	99	370	+750/–250	761	190	+970/–160	684	580	+1180/–390
Сумма		99.12			98.76			99.54	
Li, ppm	356	6.56	+6.06/–3.15	612	5.42	+3.42/–2.10	544	8.07	+6.55/–3.62
Be	267	0.56	+0.20/–0.15	202	0.46	+0.24/–0.16	94	0.68	+0.70/–0.34
B	471	13.19	+7.73/–4.87	402	13.38	+11.12/–6.07	350	6.12	+12.02/–4.05
V	81	295.7	+54.3/–45.8	573	315.0	+118.1/–85.9	539	243.8	+58.2/–47.0
Cr	269	128.2	+348.7/–83.7	608	100.1	+663.6/–87.0	354	88.9	+146.1/–55.3
Ni	90	18.6	+77.1/–15.0	346	28.4	+50.5/–18.2	235	24.9	+28.5/–13.3
Cu	34	135.0	+25.4/–21.4	376	102.9	+66.3/–40.3	275	112.2	+108.7/–55.2
Rb	104	6.98	+11.93/–4.40	706	9.02	+15.94/–5.76	742	12.55	+25.76/–8.44
Sr	378	321	+114/–84	924	315	+415/–179	901	459	+276/–173
Y	493	20.06	+6.01/–4.62	935	18.17	+9.51/–6.24	875	19.79	+9.40/–6.38
Zr	494	66.7	+31.3/–21.3	931	51.3	+59.2/–27.5	905	85.5	+74.9/–39.9
Nb	516	1.40	+0.88/–0.54	901	1.17	+2.33/–0.78	851	4.14	+8.01/–2.73
Mo	34	0.48	+0.59/–0.26	134	0.53	+0.46/–0.24	133	0.50	+0.33/–0.20
Cs	82	0.45	+0.37/–0.20	429	0.40	+0.65/–0.25	269	1.19	+2.00/–0.75
Ba	509	232	+140/–87	954	143	+263/–93	908	243	+294/–133
La	512	5.15	+3.27/–2.00	936	5.04	+9.79/–3.33	846	9.59	+10.11/–4.92
Ce	374	13.01	+6.94/–4.53	927	13.14	+21.63/–8.18	853	22.69	+24.07/–11.68
Pr	90	1.82	+1.30/–0.76	516	1.54	+1.55/–0.77	606	2.96	+2.22/–1.27
Nd	377	10.11	+4.53/–3.13	895	9.52	+10.62/–5.02	794	13.84	+10.74/–6.05
Sm	377	3.01	+1.15/–0.83	884	2.58	+1.90/–1.09	771	3.46	+2.25/–1.36
Eu	374	1.00	+0.41/–0.29	802	0.98	+0.68/–0.40	739	1.14	+0.43/–0.31
Gd	210	3.54	+1.91/–1.24	687	3.16	+1.87/–1.18	711	3.64	+2.06/–1.32
Tb	89	0.63	+0.34/–0.22	477	0.54	+0.30/–0.19	214	0.68	+0.30/–0.21
Dy	377	3.33	+1.00/–0.77	777	3.23	+1.76/–1.14	710	3.65	+1.78/–1.20
Ho	89	0.83	+0.43/–0.28	518	0.75	+0.33/–0.23	229	0.86	+0.29/–0.21
Er	377	2.17	+0.70/–0.53	744	1.88	+0.99/–0.65	681	2.10	+0.86/–0.61
Tm	89	0.32	+0.22/–0.13	407	0.30	+0.17/–0.11	130	0.36	+0.14/–0.10
Yb	377	2.03	+0.65/–0.49	811	1.82	+0.99/–0.64	772	1.89	+0.89/–0.60
Lu	90	0.33	+0.20/–0.13	589	0.30	+0.18/–0.11	239	0.37	+0.20/–0.13
Hf	313	1.81	+0.77/–0.54	682	1.27	+0.80/–0.49	565	1.99	+1.04/–0.68
Ta	95	0.06	+0.06/–0.03	452	0.08	+0.19/–0.06	540	0.28	+0.48/–0.18
Pb	281	2.28	+1.73/–0.98	597	1.96	+2.70/–1.14	690	4.05	+4.11/–2.04
Th	500	0.49	+0.41/–0.22	734	0.72	+1.43/–0.48	718	1.03	+1.17/–0.55
U	341	0.29	+0.23/–0.13	665	0.29	+0.51/–0.18	639	0.54	+0.55/–0.27
W	85	0.12	+0.15/–0.07	120	0.10	+0.25/–0.07	138	0.22	+0.23/–0.11

Примечания. Здесь и в табл. 3–7: 1 – количество определений, 2 – среднее содержание, 3 – доверительный интервал (первая цифра – плюс к среднему, вторая цифра – минус от среднего). Содержание элементов рассчитывалось как среднее геометрическое при условии, что с вероятностью 95% величина отдельного определения не отклоняется от среднего значения более, чем на 2σ .

Таблица 3. Среднее содержание петрогенных, летучих и редких элементов в магматических расплавах среднего состава ($\text{SiO}_2 = 54\text{--}66$ мас. %) Камчатки, островных дуг (III) и активных континентальных окраин (IV) по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стекол вулканических пород

Компонент	Камчатка			III			IV		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
SiO ₂	2819	60.89	+3.61/–3.41	3515	58.82	+4.54/–4.22	2089	58.22	+4.70/–4.35
TiO ₂	2785	1.08	+0.52/–0.35	3338	0.82	+0.44/–0.29	2065	0.96	+0.77/–0.43
Al ₂ O ₃	2793	15.51	+1.59/–1.44	3343	15.31	+2.37/–2.05	2070	16.00	+2.13/–1.88
FeO	2793	6.35	+3.07/–2.07	3351	7.31	+3.82/–2.51	2075	6.37	+4.05/–2.48
MnO	2649	0.13	+0.10/–0.06	3097	0.16	+0.12/–0.07	1954	0.12	+0.11/–0.06
MgO	2793	1.95	+1.26/–0.77	3355	2.04	+2.01/–1.01	2058	2.61	+2.88/–1.37
CaO	2797	5.11	+2.19/–1.53	3343	5.94	+3.29/–2.12	2065	5.40	+3.80/–2.23
Na ₂ O	2792	4.23	+1.21/–0.94	3343	3.27	+1.26/–0.91	2069	3.87	+1.11/–0.86
K ₂ O	2793	1.60	+1.28/–0.71	3342	0.99	+2.30/–0.69	2069	1.50	+1.06/–0.62
P ₂ O ₅	2521	0.30	+0.41/–0.17	2401	0.18	+0.27/–0.11	1862	0.28	+0.24/–0.13
H ₂ O	70	1.46	+1.42/–0.72	913	1.36	+1.58/–0.73	659	1.60	+2.77/–1.01
Cl, ppm	2306	960	+870/–460	1548	1470	+1480/–740	1168	950	+1290/–550
F	1288	130	+1930/–120	747	420	+740/–270	274	820	+3000/–650
S	2229	160	+450/–120	1197	290	+600/–200	894	260	+880/–200
CO ₂	14	–	–	340	90	+260/–70	124	360	+1280/–280
Сумма		98.95			96.43			97.17	
Li, ppm	144	17.21	+19.67/–9.18	437	9.58	+10.04/–4.90	248	16.16	+14.93/–7.76
Be	38	1.13	+1.05/–0.55	266	0.61	+0.36/–0.23	132	1.20	+0.67/–0.43
B	128	26.5	+25.3/–12.9	242	23.8	+31.9/–13.6	112	29.7	+67.6/–20.6
V	61	208	+264/–116	558	172	+250/–102	421	160	+70/–49
Cr	158	17.0	+125.9/–15.0	411	55.5	+630/–51	416	41.6	+123.8/–31.1
Ni	95	6.25	+12.88/–4.21	308	10.7	+43.9/–8.6	370	25.9	+36.8/–15.2
Cu	38	194	+346/–124	392	94.9	+147.4/–57.7	178	94.7	+287.7/–71.2
Rb	184	15.0	+33.3/–10.4	669	41.4	+253.5/–35.6	604	34.4	+57.1/–21.5
Sr	197	286	+201/–118	731	306	+365/–166	629	521	+353/–210
Y	201	22.7	+29.9/–12.9	713	24.7	+13.9/–8.9	611	16.1	+8.2/–5.4
Zr	201	83.5	+149.2/–53.5	744	121.5	+211.0/–77.1	634	122.6	+78.0/–47.7
Nb	201	1.50	+1.66/–0.79	707	2.27	+6.96/–1.71	630	5.33	+5.63/–2.74
Mo	41	1.08	+0.84/–0.47	88	0.85	+0.52/–0.32	27	1.18	+2.35/–0.78
Cs	126	0.75	+1.02/–0.43	302	0.46	+0.43/–0.22	256	1.73	+2.58/–1.04
Ba	204	289	+405/–169	756	418	+1375/–320	638	694	+385/–248
La	201	5.21	+6.71/–2.93	709	14.32	+71.12/–11.92	591	15.98	+11.03/–6.52
Ce	200	17.90	+27.05/–10.77	744	32.00	+120.12/–25.27	590	33.35	+21.10/–12.92
Pr	141	2.23	+2.16/–1.10	579	4.42	+10.60/–3.12	148	3.45	+2.55/–1.47
Nd	196	10.86	+14.41/–5.19	681	17.26	+39.35/–11.90	565	18.26	+10.05/–6.48
Sm	182	3.20	+3.51/–1.67	682	3.95	+4.97/–2.20	500	3.97	+1.90/–1.29
Eu	188	1.15	+0.90/–0.50	662	1.14	+0.62/–0.40	580	1.07	+0.35/–0.26
Gd	180	3.64	+3.60/–1.81	619	4.50	+2.93/–1.77	481	3.48	+1.39/–1.00
Tb	120	0.72	+0.77/–0.37	292	0.64	+0.34/–0.22	110	0.55	+0.33/–0.21
Dy	186	2.74	+3.46/–1.53	696	4.15	+2.14/–1.41	469	2.76	+1.24/–0.86
Ho	133	0.97	+1.04/–0.50	292	0.89	+0.33/–0.24	113	0.70	+0.41/–0.26
Er	188	1.81	+2.20/–0.99	642	2.47	+1.05/–0.74	434	1.35	+0.56/–0.39
Tm	120	0.40	+0.52/–0.23	235	0.38	+0.19/–0.12	39	0.22	+0.19/–0.10
Yb	182	1.85	+1.88/–0.93	694	2.57	+1.07/–0.75	528	1.33	+0.66/–0.44
Lu	136	0.45	+0.47/–0.23	514	0.41	+0.18/–0.13	149	0.39	+0.56/–0.23
Hf	185	1.85	+2.66/–1.09	455	1.75	+1.70/–0.86	193	3.24	+2.25/–1.33
Ta	123	0.15	+0.35/–0.11	580	0.52	+1.45/–0.38	190	0.42	+0.56/–0.24
Pb	149	6.08	+5.96/–3.01	396	5.10	+14.23/–3.75	243	8.29	+7.16/–3.84
Th	179	1.14	+2.39/–0.77	668	1.42	+8.67/–1.22	496	3.24	+3.31/–1.64
U	165	0.75	+0.88/–0.40	607	0.98	+6.83/–0.85	219	1.13	+1.09/–0.56
W	98	0.28	+0.42/–0.17	88	0.41	+1.04/–0.29	59	0.27	+0.27/–0.14

Таблица 4. Среднее содержание петрогенных, летучих и редких элементов в магматических расплавах кислого состава ($\text{SiO}_2 > 66$ мас. %) Камчатки, островных дуг (III) и активных континентальных окраин (IV) по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стекол вулканических пород

Компонент	Камчатка			III			IV		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
SiO ₂	4978	73.03	+2.49/-2.41	10576	74.06	+2.79/-2.69	6049	73.25	+3.54/-3.38
TiO ₂	4867	0.29	+0.22/-0.13	10091	0.17	+0.26/-0.10	5418	0.22	+0.49/-0.15
Al ₂ O ₃	4957	13.10	+1.34/-1.21	10276	12.35	+1.21/-1.10	5484	13.14	+2.09/-1.80
FeO	4957	1.26	+0.52/-0.37	10281	1.17	+0.76/-0.46	5435	1.22	+1.06/-0.57
MnO	4121	0.05	+0.09/-0.03	9102	0.06	+0.10/-0.04	4438	0.05	+0.09/-0.03
MgO	4856	0.30	+0.23/-0.13	10124	0.14	+0.36/-0.10	5146	0.19	+0.59/-0.14
CaO	4957	1.20	+0.51/-0.36	10283	0.95	+0.73/-0.41	5584	0.98	+1.28/-0.56
Na ₂ O	4956	4.26	+0.66/-0.57	10275	3.61	+0.77/-0.63	5344	3.70	+1.59/-1.11
K ₂ O	4957	2.89	+0.56/-0.47	10291	3.52	+1.40/-1.00	5393	3.75	+1.72/-1.18
P ₂ O ₅	3820	0.04	+0.08/-0.03	2761	0.07	+0.18/-0.05	3762	0.06	+0.19/-0.05
H ₂ O	200	2.55	+2.28/-1.20	2713	3.13	+2.57/-1.41	2791	1.81	+2.23/-1.00
Cl, ppm	4391	1220	+610/-410	4840	1870	+1570/-860	3275	1100	+1400/-620
F	3142	20	+60/-10	2294	370	+650/-230	1579	560	+1780/-430
S	3663	50	+200/-40	1449	80	+120/-50	1855	50	+180/-40
CO ₂	14	430	+2040/-350	608	100	+240/-70	827	30	+120/-20
Сумма		99.22			99.48			98.55	
Li, ppm	226	28.8	+27.9/-14.2	1648	42.7	+39.5/-20.5	1098	29.7	+50.2/-18.7
Be	142	1.41	+0.27/-0.23	425	1.27	+1.14/-0.60	553	2.13	+1.94/-1.02
B	200	55.5	+42.3/-24.0	1096	24.5	+21.7/-11.5	1003	44.6	+71.8/-27.5
V	99	10.8	+12.7/-5.8	709	3.28	+6.45/-2.18	75	10.57	+55.85/-8.89
Cr	60	2.91	+6.81/-2.04	446	2.62	+5.67/-1.79	126	3.67	+9.28/-2.63
Ni	23	2.60	+3.50/-1.49	334	1.29	+2.08/-0.80	35	5.07	+14.17/-3.73
Cu	50	16.5	+20.6/-9.2	911	6.20	+32.95/-5.22	582	24.15	+97.43/-19.35
Rb	148	55.6	+35.0/-21.5	2372	133	+109/-60	1554	123	+208/-77
Sr	172	99.3	+61.0/-37.8	2422	72.0	+111.1/-43.7	1240	89.2	+486.3/-75.4
Y	172	11.4	+20.3/-7.3	2306	23.5	+14.9/-9.1	725	15.2	+17.0/-8.0
Zr	196	154	+120/-67	2257	115	+90/-50	942	129	+169/-73
Nb	172	3.36	+1.49/-1.03	2279	8.09	+4.81/-3.02	803	9.39	+10.27/-4.91
Mo	17	2.66	+0.39/-0.34	774	1.48	+0.73/-0.49	409	7.04	+50.70/-6.18
Cs	110	2.03	+1.30/-0.79	759	5.93	+3.28/-2.11	550	9.00	+179/-8.57
Ba	172	699	+309/-214	2452	640	+667/-326	1034	598	+1120/-390
La	172	11.47	+6.11/-3.98	2332	24.69	+13.34/-8.66	640	19.33	+14.01/-8.12
Ce	172	24.09	+14.64/-9.09	2400	48.54	+22.94/-15.58	684	38.63	+29.79/-16.82
Pr	120	2.48	+1.49/-0.93	1310	6.10	+2.78/-1.91	125	4.77	+3.00/-1.84
Nd	170	10.01	+6.48/-3.93	1827	21.35	+11.39/-7.43	485	16.26	+13.11/-7.26
Sm	165	1.95	+1.56/-0.87	1812	4.15	+2.43/-1.53	588	3.35	+2.33/-1.37
Eu	130	0.64	+0.52/-0.29	1595	0.66	+0.75/-0.35	451	0.59	+0.41/-0.24
Gd	118	2.61	+2.04/-1.15	1448	4.16	+2.53/-1.57	322	3.27	+3.14/-1.60
Tb	77	0.56	+0.44/-0.25	536	0.69	+0.36/-0.24	115	1.33	+2.06/-0.81
Dy	133	1.98	+2.10/-1.02	1628	4.21	+2.49/-1.57	321	3.17	+3.19/-1.59
Ho	81	0.83	+0.65/-0.36	532	0.97	+0.63/-0.38	76	0.71	+0.37/-0.24
Er	134	1.58	+1.25/-0.70	1607	2.70	+1.49/-0.96	294	1.95	+1.95/-0.97
Tm	81	0.39	+0.34/-0.18	493	0.47	+0.35/-0.20	30	0.35	+0.27/-0.15
Yb	135	1.71	+1.76/-0.87	1637	2.91	+1.65/-1.05	373	1.98	+1.93/-0.98
Lu	84	0.46	+0.17/-0.12	822	0.54	+0.34/-0.21	178	0.39	+0.29/-0.17
Hf	119	2.76	+1.91/-1.13	1222	3.79	+2.24/-1.41	372	3.41	+1.89/-1.22
Ta	98	0.41	+0.32/-0.18	1479	0.98	+1.10/-0.52	390	1.55	+10.71/-1.35
Pb	98	10.28	+6.27/-3.89	1535	18.47	+10.44/-6.67	619	19.04	+9.78/-6.46
Th	161	3.12	+1.75/-1.12	1883	14.18	+12.59/-6.67	809	11.50	+14.66/-6.44
U	153	1.68	+1.05/-0.65	1816	2.81	+1.89/-1.13	775	3.53	+3.67/-1.80
W	40	0.60	+0.36/-0.22	363	1.59	+1.30/-0.72	243	54.66	+102.1/-35.60

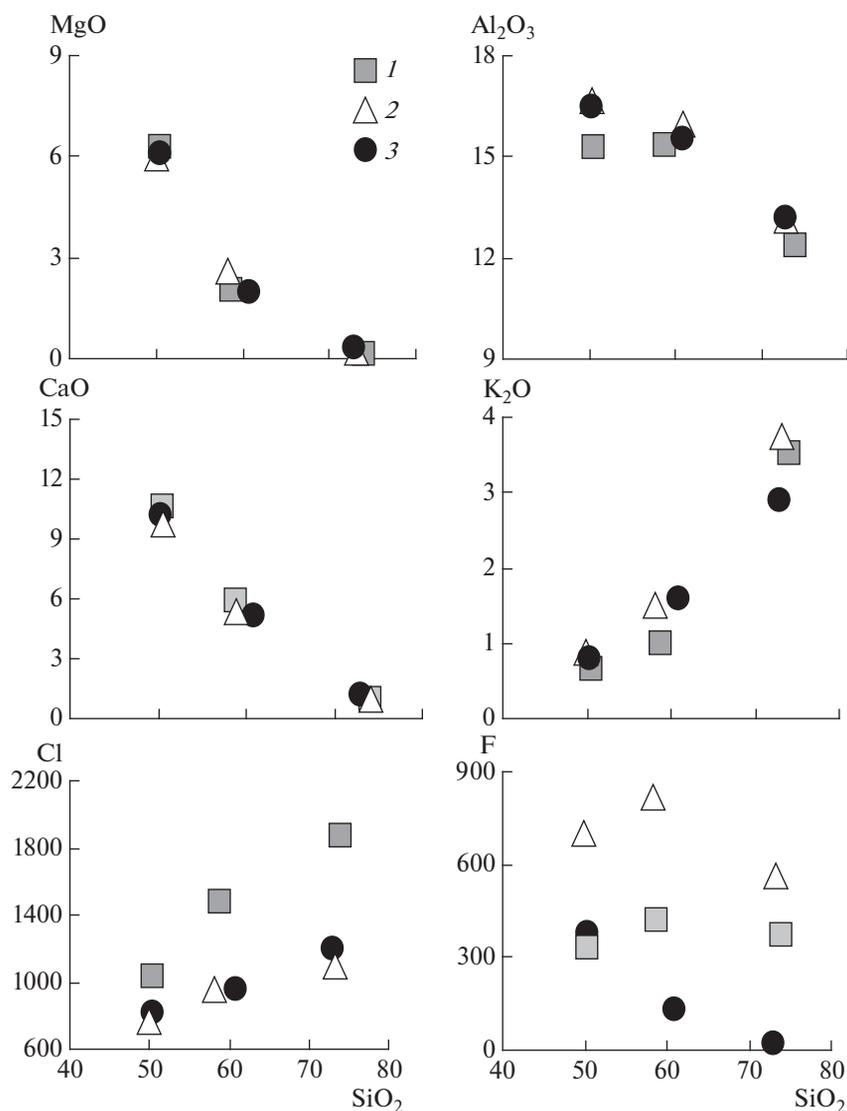


Рис. 3. Бинарные диаграммы, отражающие средние содержания петрогенных и летучих компонентов в расплавах некоторых геодинамических обстановок (1 – островные дуги, 2 – активные континентальные окраины, 3 – Камчатка).

Таким образом, можно предполагать сравнительно схожие источники магмогенерации в области базитовых выделов предположительно мантийного генезиса.

Особенности дальнейшей эволюции магматических систем отражены в характеристиках расплавов средних и кислых составов, и тут разница между вулканитами различных геотектонических обстановок становится очевидной. С ростом кремнекислотности различия в характеристиках расплавов усиливаются. Так, камчатские расплавы кислого состава обеднены Nb, Th, U, Rb и редкоземельными элементами относительно расплавов ОД и АКО (рис. 4).

При широком доверительном интервале значений (табл. 2) для большинства элементов разница в содержаниях РЗЭ не столь значительна;

однако колебания концентраций Rb, Nb, Th, U выходят за рамки стандартного отклонения.

Относительная обедненность кислых стекол Камчатки РЗЭ, с одной стороны, может быть объяснена фракционированием минералов-концентраторов средних и тяжелых РЗЭ, в частности, некоторых пироксенов и амфиболов, поскольку коэффициенты распределения РЗЭ между минералами и кислым расплавом существенно выше 1, согласно базе данных коэффициентов распределения Kd GERM (Geochemical Earth Reference Model). Однако, анализ информации из базы данных по соотношению кислых стекол основной массы пород и расплавных включений в минералах (Наумов и др., 2019) показывает, что, при сходной кремнекислотности, расплавы и остаточные стекла закономерно различаются по со-

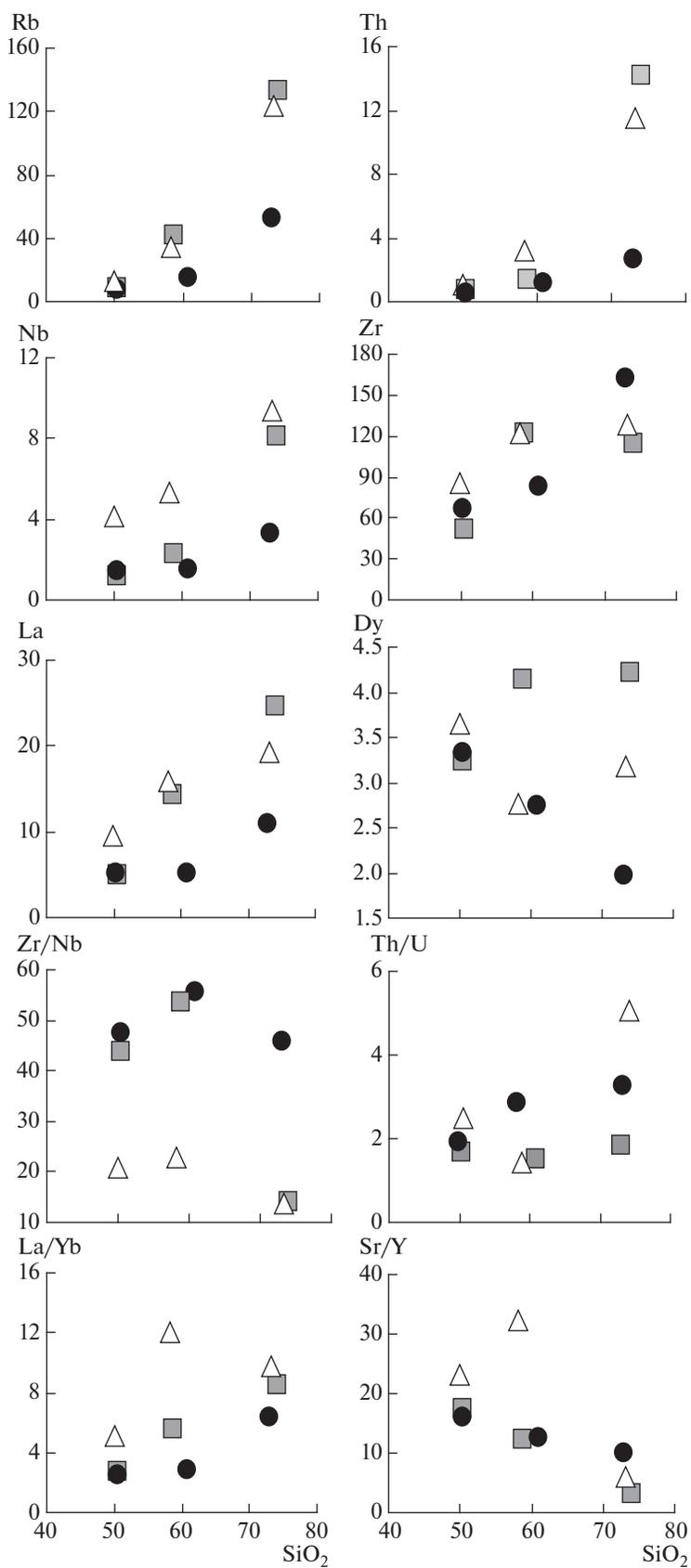


Рис. 4. Бинарные диаграммы, отражающие средние содержания редких элементов или их отношения в расплавах некоторых геодинамических обстановок. Условные обозначения на рис. 3.

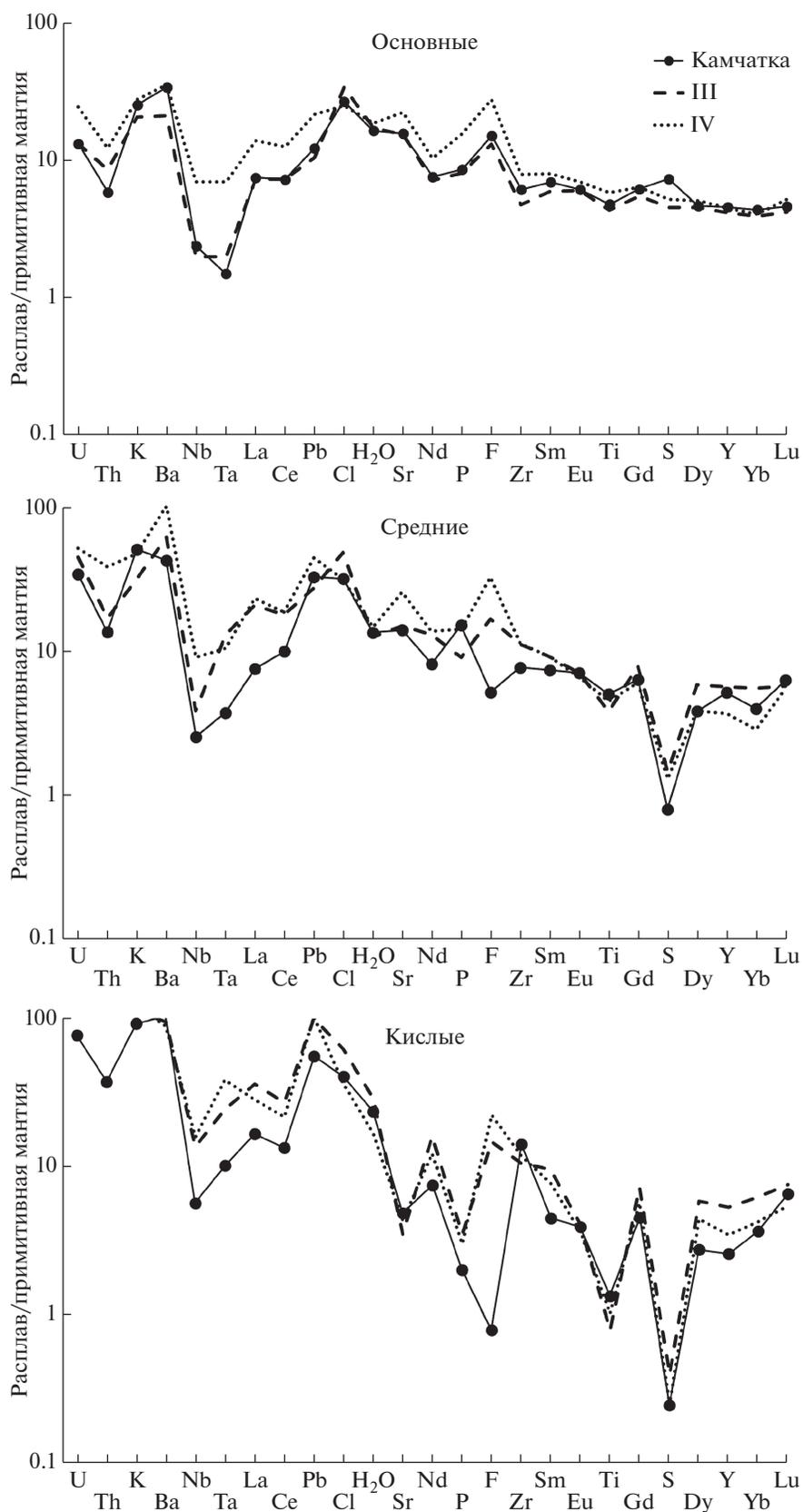


Рис. 5. Нормированное к составу примитивной мантии (по Sun, McDonough, 1989) распределение летучих, редких и редкоземельных элементов в расплавах основного, среднего и кислого состава Камчатки, островных дуг (III) и активных континентальных окраин (IV).

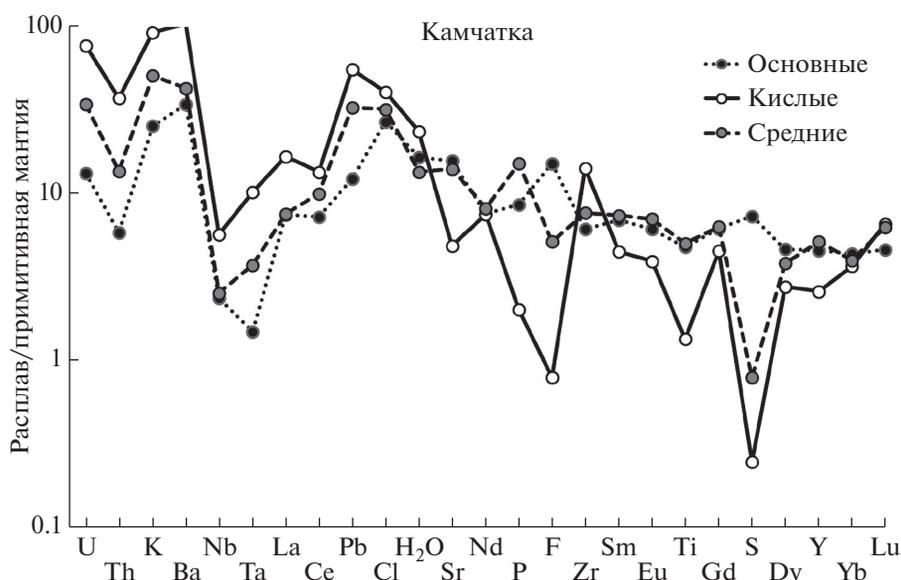


Рис. 6. Нормированное к составу примитивной мантии (по Sun, McDonough, 1989) распределение летучих, редких и редкоземельных элементов в расплавах основного, среднего и кислого состава Камчатки.

держаниям РЗЭ, причем обогащены именно остаточные стекла. Таким образом, обеднение кислых расплавов Камчатки РЗЭ не могло быть результатом только процессов кристаллизационной дифференциации. В этом случае можно рассмотреть вариант формирования первичных расплавов кислого (и, возможно, среднего) состава в результате плавления коровых базитов и метабазитов погружающейся Тихоокеанской плиты.

Бинарные диаграммы отношений редких элементов (рис. 4) подчеркивают как сходство расплавов Камчатки основного и, в некоторых случаях, среднего составов с расплавами ОД, так и отличия дацит-риолитовых расплавов Камчатки от расплавов других обстановок. К этим отличиям можно отнести сравнительно низкую степень обеднения тяжелыми РЗЭ, выраженную в отношении La/Yb , повышенные значения Zr/Nb и др.

Главный вывод, который можно сделать при сравнении редкоэлементных спектров — это то, что основные расплавы Камчатки в целом практически полностью повторяют средний состав всех имеющихся анализов расплавных включений и стекол для ОД (рис. 5). В то же время средние составы расплавов Камчатки значительно отличаются от средних составов расплавов АКО, в первую очередь, низким содержанием наиболее некогерентных элементов — Nb, Ta, La, Ce. Исключение составляют K и Ba, содержания которых в камчатских расплавах совпадает с данными для АКО. Это приводит к высоким отношениям Ba/Nb в расплавах Камчатки (166) по сравнению со всеми ОД (122) и АКО (59), что может свидетельствовать о повышенном вкладе субдукцион-

ных компонентов при плавлении мантийного клина (Peate et al., 2001). Нарастание различий между расплавами разных геодинамических обстановок и Камчатки от основных составов к кислым также фиксируется на диаграммах распределения микроэлементов, что также свидетельствует о многообразии и сложности процессов эволюции магматических систем.

В ряде исследований были установлены закономерные вариации состава магм и пород Камчатки в отношении редких (Portnyagin et al., 2005) и летучих компонентов (Churikova et al., 2007). Эти вариации связываются с различным вкладом мантийных и коровых (субдукционных) компонентов в составе первичных расплавов и разным составом флюидов, отделяющихся от погружающейся плиты. Для того чтобы выявить возможное существование крупномасштабных закономерных вариаций для камчатского региона, выборка анализов стекол и расплавных включений была разделена на две части. В первую вошли образцы южной Камчатки, во вторую — образцы северной и центральной Камчатки (границей раздела принято считать Малко-Петропавловскую зону поперечных дислокаций (Авдейко и др., 2002). Результаты расчетов средних содержаний элементов в расплавах этих частей приведены в табл. 5–7. Для сравнения они показаны на рис. 7. В первую очередь следует отметить, что для большинства элементов различия между регионами оказались незначительными, что, вероятно, свидетельствует об относительной однородности мантийного источника магм. Но есть и некоторые значимые различия. Для мафических расплавов наблюдается относительное обогащение расплавов южной Камчатки

Таблица 5. Среднее содержание элементов в магматических расплавах основного состава ($\text{SiO}_2 = 40\text{--}54$ мас. %) Камчатки по данным изучения расплавленных включений в минералах и закалочных стеклах вулканических пород

Компонент	Южная Камчатка			Центральная и Северная Камчатка		
	1	2	3	1	2	3
SiO ₂	233	50.40	+2.57/–2.44	1647	50.30	+2.46/–2.35
TiO ₂	233	0.98	+0.62/–0.38	1531	1.04	+0.41/–0.29
Al ₂ O ₃	233	17.28	+3.97/–3.23	1625	16.40	+2.31/–2.02
FeO	233	9.32	+4.16/–2.88	1625	8.53	+2.37/–1.85
MnO	229	0.21	+0.19/–0.10	1592	0.14	+0.08/–0.05
MgO	233	5.54	+3.38/–2.10	1638	6.30	+3.94/–2.43
CaO	230	10.15	+2.30/–1.88	1625	10.40	+3.24/–2.47
Na ₂ O	233	2.52	+1.26/–0.84	1520	3.09	+0.86/–0.67
K ₂ O	233	0.59	+0.64/–0.31	1520	0.80	+0.51/–0.31
P ₂ O ₅	213	0.17	+0.31/–0.11	1368	0.17	+0.12/–0.07
H ₂ O	86	2.29	+1.26/–0.81	486	1.75	+1.98/–0.93
Cl, ppm	67	620	+1020/–380	1124	810	+490/–310
F	38	880	+1150/–820	303	380	+240/–150
S	57	370	+960/–260	1139	1510	+1030/–610
Сумма		99.64			99.19	
Li	99	10.57	+20.19/–6.94	301	5.93	+4.11/–2.43
Be	17	0.42	+0.55/–0.24	273	0.55	+0.22/–0.16
B	121	16.07	+14.06/–7.50	369	12.18	+6.88/–4.40
V	17	312.9	+56.8/–48.0	101	282.6	+63.7/–52.0
Cr	95	43.2	+130.6/–32.4	195	154.3	+332.3/–105.4
Ni	82	13.2	+43.3/–10.1	8	–	–
Rb	88	5.70	+8.15/–3.36	37	9.13	+11.71/–5.13
Sr	100	352	+159/–110	298	311	+108/–80
Y	129	19.5	+12.45/–7.60	391	20.0	+4.54/–3.70
Zr	119	45.9	+54.0/–24.8	392	68.8	+27.0/–19.4
Nb	119	0.96	+1.29/–0.55	410	1.60	+1.00/–0.61
Mo	34	0.48	+0.59/–0.26	11	1.00	+0.54/–0.35
Cs	82	0.45	+0.37/–0.20	8	–	–
Ba	117	149	+183/–82	409	239	+147/–91
La	119	4.22	+4.61/–2.20	410	5.12	+2.57/–1.71
Ce	98	11.21	+10.64/–5.46	296	13.51	+6.28/–4.29
Pr	82	1.77	+1.29/–0.74	29	3.27	+0.86/–0.68
Nd	100	9.23	+7.77/–4.22	297	10.29	+3.83/–2.79
Sm	100	2.80	+2.23/–1.24	297	3.02	+0.92/–0.71
Eu	100	0.99	+0.49/–0.33	318	1.03	+0.38/–0.28
Gd	92	3.58	+2.69/–1.53	138	3,64	+1.51/–1.07
Tb	82	0.65	+0.36/–0.23	28	0.63	+0.22/–0.16
Dy	100	3.48	+2.54/–1.47	297	3.30	+0.73/–0.60
Ho	82	0.85	+0.47/–0.30	28	0.73	+0.19/–0.15
Er	100	2.34	+1.60/–0.95	321	2.15	+0.54/–0.43
Tm	82	0.33	+0.24/–0.14	28	0.31	+0.08/–0.06
Yb	100	2.15	+1.43/–0.86	297	1.99	+0.50/–0.40
Lu	82	0.35	+0.22/–0.13	8	0.23	+0.01/–0.01
Hf	97	1.37	+0.93/–0.55	257	2.09	+0.76/–0.56
Ta	83	0.06	+0.06/–0.03	12	0.08	+0.02/–0.02
Pb	88	3.17	+2.74/–1.47	212	1.84	+1.33/–0.77
Th	119	0.44	+0.69/–0.27	398	0.48	+0.35/–0.20
U	100	0.15	+0.21/–0.09	284	0.29	+0.21/–0.12
W	82	0.12	+0.15/–0.07	3	–	–

Таблица 6. Среднее содержание элементов в магматических расплавах среднего состава ($\text{SiO}_2 = 54\text{--}66$ мас. %) Камчатки по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стекол вулканических пород

Компонент	Южная Камчатка			Центральная и Северная Камчатка		
	1	2	3	1	2	3
SiO_2	205	58.56	+3.38/–3.19	2626	61.03	+3.60/–3.40
TiO_2	205	1.04	+0.66/–0.40	2575	1.08	+0.51/–0.34
Al_2O_3	205	15.76	+4.46/–3.47	2600	15.53	+1.46/–1.33
FeO	205	7.57	+3.44/–2.37	2600	6.24	+3.09/–2.07
MnO	171	0.16	+0.17/–0.08	2474	0.14	+0.09/–0.05
MgO	190	2.13	+1.94/–1.02	2600	1.91	+1.23/–0.75
CaO	190	6.16	+2.79/–1.92	2604	5.05	+2.12/–1.49
Na_2O	204	3.50	+1.45/–1.02	2583	4.27	+1.17/–0.92
K_2O	205	1.51	+1.84/–0.83	2583	1.58	+1.24/–0.70
P_2O_5	140	0.24	+0.28/–0.13	2382	0.30	+0.41/–0.17
H_2O	9	0.58	+0.28/–0.19	61	1.67	+1.32/–0.74
Cl, ppm	78	700	+860/–380	2229	960	+870/–460
F	32	1870	+9780/–1570	1257	130	+1920/–120
S	70	240	+290/–130	2161	160	+450/–120
Сумма		97.49			98.93	
Li	105	22.0	+24.2/–11.5	39	11.4	+12.2/–5.9
Be	13	1.35	+0.34/–0.27	25	0.94	+1.12/–0.51
B	105	28.2	+22.9/–12.6	23	13.3	+11.8/–6.3
V	10	193.8	+90.7/–61.8	51	218.6	+280.8/–122.9
Cr	109	11.0	+37.5/–8.5	49	–	–
Ni	92	6.29	+10.66/–3.96	3	–	–
Cu	11	532	+304/–194	27	146.0	+165.4/–77.5
Rb	105	17.1	+36.6/–11.7	79	14.0	+32.3/–9.7
Sr	105	314	+130/–92	92	218	+313/–129
Y	105	28.4	+20.4/–11.8	96	12.2	+28.6/–8.6
Zr	105	97.2	+112.1/–52.0	96	69.0	+167.2/–48.8
Nb	105	1.67	+1.61/–0.82	96	1.26	+1.73/–0.73
Mo	38	1.01	+0.81/–0.45	6	–	–
Cs	92	0.92	+1.29/–0.54	34	0.35	+0.63/–0.23
Ba	105	317	+394/–176	99	230	+474/–155
La	105	7.62	+7.46/–3.77	96	2.61	+4.95/–1.71
Ce	105	20.1	+18.7/–9.7	95	13.06	+28.56/–8.96
Pr	92	3.05	+2.17/–1.27	49	0.81	+2.09/–0.64
Nd	105	16.8	+13.8/–7.6	91	3.44	+9.23/–2.51
Sm	105	4.44	+3.32/–1.90	77	2.29	+3.94/–1.45
Eu	105	1.17	+0.53/–0.36	83	0.82	+1.04/–0.46
Gd	105	4.99	+3.47/–2.05	75	2.28	+4.14/–1.47
Tb	92	0.85	+0.42/–0.28	28	0.03	+0.06/–0.02
Dy	105	5.02	+3.27/–1.98	81	1.93	+3.29/–1.22
Ho	92	1.02	+0.74/–0.43	41	0.15	+0.63/–0.12
Er	105	3.24	+2.40/–1.38	83	1.19	+2.82/–0.84
Tm	92	0.45	+0.38/–0.21	28	0.05	+0.02/–0.02
Yb	105	3.27	+2.46/–1.40	77	1.28	+2.08/–0.80
Lu	92	0.51	+0.37/–0.22	44	0.15	+0.35/–0.10
Hf	105	2.36	+2.43/–1.20	80	1.58	+3.73/–1.11
Ta	102	0.12	+0.19/–0.07	46	0.36	+1.25/–0.28
Pb	102	6.24	+6.49/–3.18	47	5.67	+4.82/–2.61
Th	105	1.14	+2.36/–0.77	74	1.31	+2.18/–0.82
U	105	0.56	+0.73/–0.32	60	1.00	+1.06/–0.51
W	92	0.28	+0.43/–0.17	6	–	–

Таблица 7. Среднее содержание элементов в магматических расплавах кислого состава ($\text{SiO}_2 > 66$ мас. %) Камчатки по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стекол вулканических пород

Компонент	Южная Камчатка			Центральная и Северная Камчатка		
	1	2	3	1	2	3
SiO_2	393	73.77	+1.97/–1.92	4585	72.96	+2.53/–2.45
TiO_2	310	0.17	+0.08/–0.06	4559	0.30	+0.22/–0.13
Al_2O_3	393	12.23	+1.37/–1.23	4564	13.16	+1.27/–1.16
FeO	393	0.89	+0.47/–0.31	4564	1.30	+0.52/–0.37
MnO	290	0.05	+0.08/–0.03	3831	0.05	+0.09/–0.03
MgO	305	0.18	+0.14/–0.08	4551	0.31	+0.22/–0.13
CaO	393	0.91	+0.46/–0.31	4564	1.23	+0.51/–0.36
Na_2O	392	3.66	+0.69/–0.58	4566	4.31	+0.61/–0.54
K_2O	393	3.71	+1.43/–1.03	4566	2.86	+0.52/–0.44
P_2O_5	266	0.03	+0.04/–0.02	3555	0.04	+0.08/–0.03
H_2O	14	6.26	+1.45/–1.17	186	2.47	+2.18/–1.16
Cl, ppm	285	1640	+290/–250	4107	1200	+590/–390
F	195	90	+1080/–80	2947	20	+50/–10
S	199	80	+80/–40	3464	50	+200/–40
Сумма		102.01			99.12	
Li	51	28.3	+44.4/–17.3	175	28.8	+14.0/–13.1
Be	–	–	–	139	1.40	+0.24/–0.20
B	51	71.95	+37.1/–24.5	149	52.0	+41.2/–23.0
V	25	5.97	+2.81/–1.91	74	12.8	+14.9/–6.9
Cr	27	6.51	+10.32/–2.99	33	1.55	+1.66/–0.80
Ni	23	2.60	+3.50/–1.49	–	–	–
Rb	51	59.9	+52.3/–27.9	97	54.0	+27.3/–18.1
Sr	51	103.2	+77.2/–44.2	121	97	+51/–33
Y	51	23.7	+25.3/–12.2	121	8.2	+13.4/–5.1
Zr	51	130.8	+74.7/–47.5	145	159	+123/–69
Nb	51	3.53	+1.54/–1.07	121	3.26	+1.48/–1.02
Mo	–	–	–	17	2.66	+0.39/–0.34
Cs	48	3.04	+2.08/–1.24	62	1.78	+0.93/–0.61
Ba	51	788	+331/–233	121	668	+273/–194
La	51	14.6	+5.4/–4.0	121	10.4	+5.4/–3.6
Ce	51	31.8	+10.5/–7.9	121	21.8	+11.2/–7.4
Pr	48	3.70	+1.61/–1.12	72	2.20	+1.34/–0.83
Nd	51	15.3	+11.9/–6.7	119	9.0	+5.6/–3.5
Sm	51	3.33	+3.83/–1.78	114	1.79	+1.37/–0.78
Eu	51	0.71	+0.63/–0.34	79	0.61	+0.49/–0.27
Gd	51	3.54	+4.69/–2.02	67	2.31	+1.49/–0.90
Tb	48	0.59	+0.57/–0.29	29	0.52	+0.08/–0.07
Dy	51	3.70	+4.95/–2.12	82	1.94	+2.00/–0.98
Ho	48	0.82	+0.74/–0.39	33	0.79	+0.10/–0.09
Er	51	2.62	+3.32/–1.46	83	1.49	+1.21/–0.67
Yb	51	2.70	+2.23/–1.22	84	1.42	+1.83/–0.80
Lu	48	0.46	+0.31/–0.19	26	0.45	+0.07/–0.06
Hf	51	3.66	+1.80/–1.21	68	2.16	+2.10/–1.06
Ta	48	0.36	+0.24/–0.14	50	0.50	+0.56/–0.27
Pb	48	13.52	+5.43/–3.87	50	8.14	+3.40/–2.40
Th	51	4.28	+1.74/–1.24	110	2.68	+1.00/–0.73
U	51	1.47	+0.66/–0.45	102	1.80	+1.37/–0.78
W	23	0.82	+0.72/–0.38	17	0.43	+0.06/–0.05

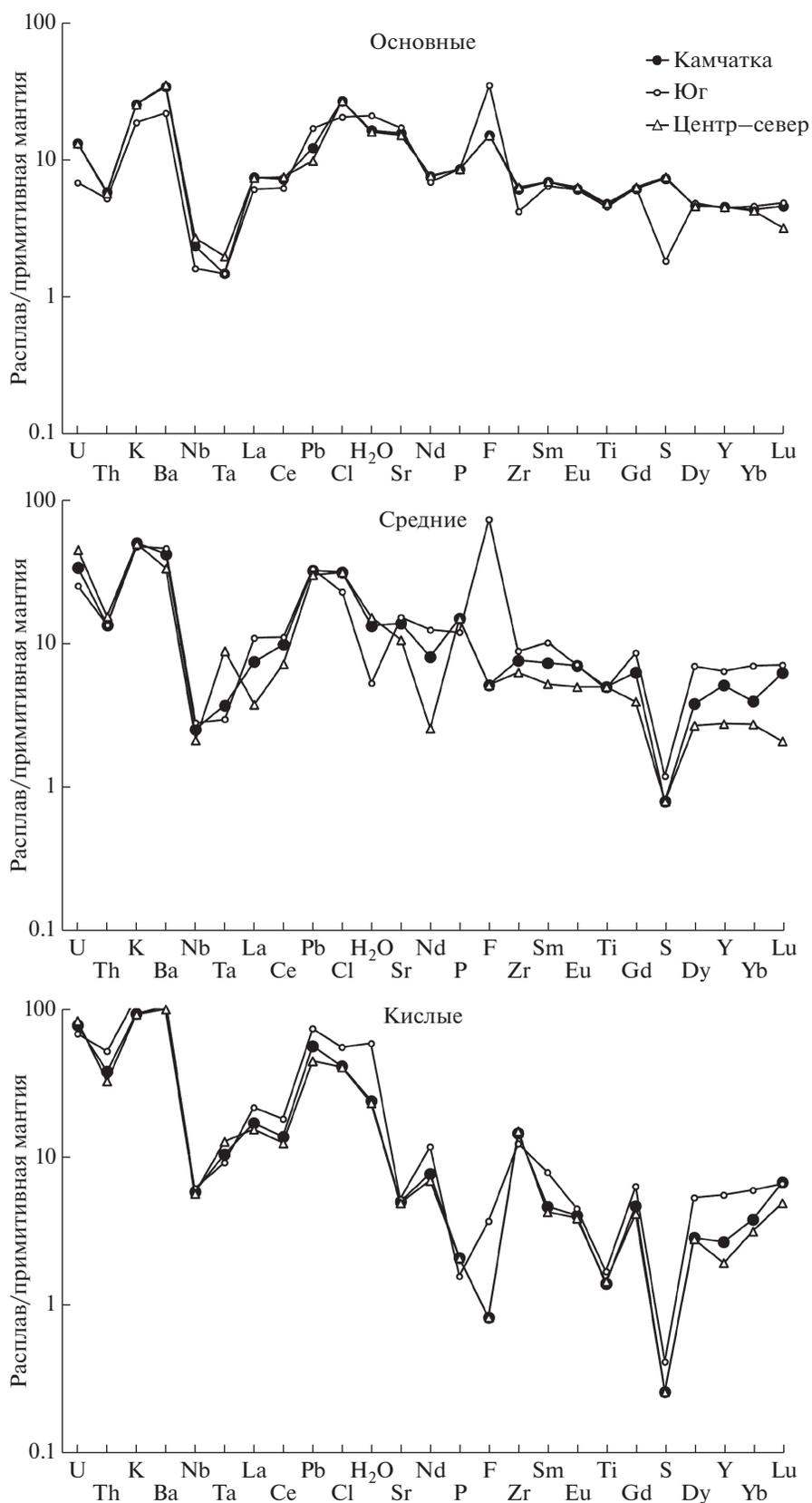


Рис. 7. Нормированное к составу примитивной мантии (по Sun, McDonough, 1989) распределение летучих, редких и редкоземельных элементов в расплавах основного, среднего и кислого состава южной части Камчатки в сравнении с центральной и северной Камчаткой.

F и Pb относительно составов северной и центральной Камчатки. Это отражается в существенно разных отношениях F/Cl и Pb/Ce : F/Cl = 1.4 для южной Камчатки и 0.5 для центральной и северной; Pb/Ce = 0.3 для южной Камчатки и 0.1 для центральной и северной. Такие отношения считаются показателями вклада субдукционного компонента при образовании основных расплавов (Urann et al., 2017). С другой стороны, отношение F/Cl в магмах может контролироваться присутствием амфибола в источнике, поскольку F, в отличие от сильно несовместимого Cl, может в значительной степени задерживаться в амфибол-содержащем перидотите (Van den Bleecken, Koga, 2015; Benard et al., 2017). Это приводит к положительной корреляции между глубиной границы субдукционная плита—мантийный клин и содержанием F в первичных расплавах (Churikova et al., 2007; Benard et al., 2017).

Региональные различия составов являются менее четкими для средних и кислых расплавов вследствие более высокого разброса значений (рис. 7). Сопоставляя эти составы со средними значениями для расплавов ОД, можно отметить заметное обеднение расплавов Камчатки сильно несовместимыми элементами Nb, Ta, La и Ce. Эта же особенность отмечалась и для основных расплавов. Также проявлено обогащение расплавов южной Камчатки фтором по сравнению с расплавами северной и центральной Камчатки.

Подводя итог краткого сопоставления средних составов расплавов, можно отметить следующее. Многие исследователи отмечали необычную геодинамическую позицию Камчатки, не отвечающую классической островной дуге. Камчатку рассматривали в качестве комплекса аккрегированных островных дуг (Watson, Fujita, 1985), активной континентальной окраины (Федоров и др., 2008), переходной структуры между островной дугой и континентом (Gill, 1981). Однако, геохимия основных магм отвечает типичной островной дуге. Большая мощность и дифференциация коры не оказывает существенного влияния на характеристики основных магм. Это свидетельствует о том, что основными процессами магмообразования являлись, как и в других островных дугах, плавление мантийного клина под воздействием расплавов и флюидов, выделяющихся из погружающейся океанической плиты. Влияние коровой ассимиляции не было значительным. Небольшие отличия от средних составов островодужных магм могут объясняться варьирующим вкладом субдукционного компонента. Не следует, однако, забывать, что наши выводы основаны на усреднении данных для большого количества объектов и отражают различия только высокого порядка. Не исключена, конечно, возможность проявления коровой ассимиляции на конкретном вулкане или группе вулканов (Kayzar et al., 2014; Bindeman et al., 2004).

Авторы выражают благодарность М.М. Певзнер за консультации в процессе написания статьи и М.В. Портнягину за конструктивные замечания, учтенные при доработке статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-05-00224.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдейко Г.П., Попруженко С.В., Палуева А.А. (2002) Тектоническое развитие и вулcano-тектоническое районирование Курило-Камчатской островодужной системы. *Геотектоника* (4), 64-80.
- Авдейко Г.П., Палуева А.А., Хлебородова О.А. (2006) Геодинамические условия вулканизма и магмообразования Курило-Камчатской островодужной системы. *Петрология* 14(3), 249-267.
- Бабанский А.Д., Соловова И.П., Рябчиков И.Д., Богатиков О.А. (1980) Исходные магмы щелочноземельных серий по данным изучения расплавленных микроклучений. *ДАН СССР* 253(4), 945-947.
- Балеста С.Т. (1991) Строеие земной коры и магматические очаги областей современного вулканизма Камчатки. *Действующие вулканы Камчатки* 1, 36-45.
- Бурикова И.А., Парфенова О.В. (2013) Алливалиты — как показатель фракционной кристаллизации низкокальциевых известково-щелочных серий островодужного типа. *Геохимия* (1), 38-49.
- Burikova I.A., Parfenova O.V. (2013) Allivalites as indicators of fractional crystallization of the Island arc calc alkaline low K series. *Geochem. Int.* 51(1), 33-43.
- Вавилов М.А., Базарова Т.Ю., Кузнецова И.К. (1984) Особенности кристаллизации андезито-базальтового расплава Хайрюзовского массива (Западная Камчатка). *Геология и геофизика* (7), 137-142.
- Гриб Е.Н., Леонов В.Л. (2004) Эволюция магматических очагов кальдер Южного сектора Карымского вулканического центра. Часть I. Геология, строение и состав пирокластических потоков. *Вулканология и сейсмология* (4), 21-40.
- Гриб Е.Н., Леонов В.Л., Рылова С.А., Философова Т.М., Рогозин А.Н., Кляпицкий Е.С. (2016) Включения расплава во вкрапленниках кварца в кислых породах Банно-Карымшинского района (Камчатка). *Вулканология и сейсмология* (2), 1-17.
- Злобин С.К., Каменецкий В.С., Соболев А.В., Кононова Н.Н. (1990) Исходный состав пород комплекса параллельных даек офиолитов Майницкой зоны Корякии (по данным изучения расплавленных включений в хромшпинелидах). *Геохимия* (11), 1595-1604.
- Каменецкий В.С., Портнягин М.В., Соболев А.В., Данишевский Л.В. (1992) Условия кристаллизации и состав расплава пикрит-базальтовой толщи хребта Тумрок (Восточная Камчатка). *Геохимия* (8), 1133-1148.
- Коваленко Д.В., Наумов В.Б., Прокофьев В.Ю., Агеева О.А., Андреева О.А., Ковальчук Е.В., Ерофеева К.Г., Угрюмова Н.Ю. (2017) Химический состав расплавов раннеэоценового вулканического центра мыса Хайрюзова (западная Камчатка) по данным изучения включений в минералах. *Петрология* 25(1), 71-91.

- Колосков А.В., Пузанков М.Ю., Пирожкова Е.С. (2001) Включения ультрамафитов в базальтоидах островных дуг: к проблеме состава и генезиса переходного слоя “коро-манттиной смеси” в островодужных системах. *Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы, ИВГиГ ДВО РАН*, 123-152.
- Красов Н.Ф., Клоккяйти Р. (1979) Ликвация силикатного расплава и ее возможная петрогенетическая роль по данным изучения расплавных включений. *ДАН СССР* **248** (1), 201-204.
- Леонов В.Л., Гриб Е.Н. (2004) Структурные позиции и вулканизм четвертичных кальдер Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 5-189.
- Миронов Н.Л., Портнягин М.В., Плечов П.Ю., Хубуная С.А. (2000) Заключительные этапы эволюции магм Ключевского вулкана (Камчатка) по данным изучения расплавных включений в минералах высокоглиноземистых базальтов. *Петрология* **9**(1), 51-69.
- Миронов Н.Л., Портнягин М.В. (2011) Содержание H_2O и CO_2 в исходных магмах Ключевского вулкана по данным изучения расплавных и флюидных включений в оливине. *Геология и геофизика* **52**(11), 1718-1735.
- Наумов В.Б., Коваленко В.И., Дорофеева В.А., Ярмолюк В.В. (2004) Средние содержания петрогенных, летучих и редких элементов в магматических расплавах различных геодинамических обстановок. *Геохимия* (10), 1113-1124.
- Naumov V.B., Kovalenko V.I., Dorofeeva V.A., Yarmolyuk V.V. (2004) Average concentrations of major, volatile, and trace elements in magmas of various geodynamic settings. *Geochem. Int.* **42** (10), 977-987.
- Наумов В.Б., Коваленко В.И., Дорофеева В.А., Гирнис А.В., Ярмолюк В.В. (2010) Средний состав магматических расплавов главных геодинамических обстановок по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стекол пород. *Геохимия* (12), 1266-1288. Naumov V.B., Kovalenko V.I., Dorofeeva V.A., Girnis A.V., Yarmolyuk V.V. (2010) Average compositions of igneous melts from main geodynamic settings according to the investigation of melt inclusions in minerals and quenched glasses of rocks. *Geochem. Int.* **48**(12), 1185-1207.
- Наумов В.Б., Дорофеева В.А., Гирнис А.В., Ярмолюк В.В. (2017) Среднее содержание летучих компонентов, петрогенных и редких элементов в магматических расплавах главных геодинамических обстановок Земли. I. Расплавы основного состава. *Геохимия* (7), 618-643. Naumov V.B., Dorofeeva V.A., Girnis A.V., Yarmolyuk V.V. (2017) Mean concentrations of volatile components, major and trace elements in magmatic melts in major geodynamic environments on Earth. I. Mafic melts. *Geochem. Int.* **55**(7), 629-653.
- Наумов В.Б., Толстых М.Л., Гриб Е.Н., Леонов В.Л., Кононкова Н.Н. (2008) Химический состав, летучие компоненты и редкие элементы в магмах Карымского вулканического центра и вулкана Головнина (остров Кунашир) по данным изучения расплавных включений. *Петрология* **16**(1), 3-20.
- Перепелов А.Б., Чашин А.А., Мартынов Ю.А. (2006) Магматические образования обстановок трансформных континентальных окраин: Срединно-Камчатская зона (плиоцен-голоцен). *Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России*. Владивосток: Дальнаука, 382-398.
- Плечов П.Ю., Миронов Н.Л., Плечова А.А., Хубуная С.А. (2000) Особенности химического состава и образования расплавных включений в плагиоклазах потока Апахончич, влк. Ключевской (Камчатка). *Геохимия* (1), 39-47.
- Plechov P.Yu., Mironov N.L., Plechova A.A., Khubunaya S.A. (2000) Compositional Peculiarities and Genesis of Melt Inclusions in Plagioclase from the Apakhonchich Lava Flow, Klyuchevskoi Volcano, Kamchatka *Geochem. Int.* **38**(1), 34-41.
- Плечов П.Ю., Шишкина Т.А., Ермаков В.А., Портнягин М.В. (2008) Условия формирования алливалитов – оливин-анортитовых кристаллических включений – Курило-Камчатской дуги. *Петрология* **16**(3), 248-276.
- 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* **433**(3), 386-389.
- Плечова А.А., Портнягин М.В., Базанова Л.И. (2011) Происхождение и эволюция исходных магм фронтальных вулканов Камчатки по данным изучения магматических включений в оливине из пирокластических пород вулкана Жупановский. *Геохимия* (8), 787- 812.
- Plechova A.A., Portnyagin M.V., Bazanova L.I. (2011) The origin and evolution of the parental magmas of frontal volcanoes in Kamchatka: Evidence from magmatic inclusions in olivine from Zhupanovsky volcano. *Geochem. Int.* **49**(8), 743-767.
- Пономарева В.В., Чурикова Т.Г., Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Певзнер М.М., Сулержицкий Л.Д. (2008) *Позднеплейстоцен-голоценовый вулканизм Камчатки. В кн.: Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. (II)*. М.: Изд-во ИГЕМ; 19-40.
- Портнягин М.В., Плечов П.Ю., Осипенко А.Б. (2000) Влияние природной декрепитации на состав экспериментально гомогенизированных расплавных включений в оливине: на примере изучения меланократовых базальтов вулкана Авача (Камчатка). *Вестник ОИГГН РАН* (5), 62-64.
- Портнягин М.В., Миронов Н.Л., Матвеев С.В., Плечов П.Ю. (2005) Петрология “авачитов” – высокомагнетизальных базальтов Авачинского вулкана (Камчатка): II. Расплавные включения в оливине. *Петрология* **13** (4), 358-388.
- Портнягин М.В., Савельев Д.П., Хернле Л. (2005) Плюмовая ассоциация меловых океанических базальтов Восточной Камчатки: особенности состава шпинели и родоначальных магм. *Петрология* **13**(6), 626-645.
- Портнягин М.В., Наумов В.Б., Миронов Н.Л., Белосусов И.А., Кононкова Н.Н. (2011) Состав и эволюция расплавов извержения 1996 года в Карымском озере (Восточная Камчатка) по данным изучения включений в минералах. *Геохимия* (11), 1153-1178.
- Portnyagin M.V., Naumov V.B., Mironov N.L., Belousov I.A., Kononkova N.N. (2011) Composition and evolution of the melts erupted in 1996 at Karymskoe lake, Eastern Kamchatka: Evidence from inclusions in minerals. *Geochem. Int.* **49**(11), 1085-1110.
- Портнягин М.В., Миронов Н.Л., Назарова Д.П. (2017) Распределение меди между оливином и расплавными

- включениями и ее содержание в примитивных островодужных магмах Камчатки. *Петрология* **25**(4), 419-432.
- Селиверстов Н.И. (2009) Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Ин-т вулканологии и сейсмологии, Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ, С. 114.
- Соболев А.В., Каменецкий В.С., Кононкова Н.Н. (1989) Новые данные по петрологии и геохимии ультрамафических вулканитов Валагинского хребта (Восточная Камчатка). *Геохимия* (12), 1694-1709.
- Стеблов Г.М., Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Фролов Д.И., Грекова Т.А. (2010) Динамика Курило-Камчатской зоны субдукции по данным GPS. *Физика Земли* **5**, 77-82.
- Тетроева С.А., Плечов П.Ю. (2000) Петрология пород Камбального вулкана по данным изучения расплавленных включений. *Труды ВНИИСИМС*, 313-321.
- Тимина Т.Ю., Ковязин С.В., Томиленко А.А. (2012) Состав расплавленных и флюидных включений в шпинели из ксенолитов перидотитов Авачинского вулкана (Камчатка). *ДАН* **442**(2), 239-243.
- Толстых М.Л., Наумов В.Б., Бабанский А.Д., Хубуная С.А., Кононкова Н.Н. (1998) Состав расплава и условия кристаллизации андезитов вулкана Шивелуч (Камчатка) по данным изучения включений в минералах. *ДАН* **359**(5), 676-679.
- Толстых М.Л., Наумов В.Б., Богоявленская Г.Е., Кононкова Н.Н. (1999) Андезит-дацит-риолитовые расплавы при кристаллизации вкрапленников андезитов вулкана Безымянный, Камчатка. *Геохимия* (1), 14-24.
- Толстых М.Л., Наумов В.Б., Кононкова Н.Н. (2000) Состав магм, формировавших дациты вулкана Дикий Гребень, Южная Камчатка, по данным изучения расплавленных включений. *Геохимия* (10), 1116-1121.
- Tolstykh M.L., Naumov V.B., Kononkova N.N. (2000) Composition of magmas which formed dacite of Dikii Greben' volcano (Southern Kamchatka): Evidence from the study of melt inclusions. *Geochem. Int.* **38**(10), 1020-1025.
- Толстых М.Л., Наумов В.Б., Озеров А.Ю., Кононкова Н.Н. (2001) Состав магм извержения 1996 г. Карымского вулканического центра (Камчатка) по данным изучения расплавленных включений. *Геохимия* (5), 498-509.
- Tolstykh M.L., Naumov V.B., Ozerov A.Yu., Kononkova N.N. (2001) Composition of magmas of the 1996 eruption at the Karymskii volcanic center, Kamchatka: Evidence from melt inclusions. *Geochem. Int.* **39**(5), 447-458.
- Толстых М.Л., Бабанский А.Д., Наумов В.Б., Базанова Л.И., Кононкова Н.Н. (2002) Химический состав, элементы-примеси и летучие компоненты расплавленных включений в минералах андезитов вулкана Авачинский, Камчатка. *Геохимия* (11), 1229-1237.
- Tolstykh M.L., Babansky A.D., Naumov V.B., Bazanova L.I., Kononkova N.N. (2002) Chemical composition, trace elements, and volatile components of melt inclusions in minerals from andesites of the Avachinskii volcano, Kamchatka. *Geochem. Int.* **40**(11), 1112-1129.
- Толстых М.Л., Наумов В.Б., Гавриленко М.Г., Озеров А.Ю., Кононкова Н.Н. (2012) Химический состав, летучие компоненты и элементы-примеси расплавленных вулканического центра Горелый (Южная Камчатка) по данным изучения включений в минералах. *Геохимия* (6), 576-606.
- Tolstykh M.L., Naumov V.B., Gavrilenko M.G., Ozerov A.Yu., Kononkova N.N. (2012) Chemical composition, volatile components, and trace elements in the melts of the Gorely volcanic center, Southern Kamchatka: Evidence from inclusions in minerals. *Geochem. Int.* **50**(6), 522-550.
- Толстых М.Л., Певзнер М.М., Наумов В.Б., Бабанский А.Д., Кононкова Н.Н. (2015) Типы расплавов, формировавших пирокластические породы различных структурно-возрастных комплексов вулканического массива Шивелуч (Камчатка), по данным изучения включений в минералах. *Петрология* **23**(4), 521-560.
- Толстых М.Л., Певзнер М.М., Наумов В.Б., Бабанский А.Д. (2019) Характеристика расплавов, формировавших тефру плейстоцен-голоценовых извержений вулкана Ичинский (Камчатка), по данным изучения расплавленных включений. *Геохимия* (3), 237-262.
- Tolstykh M.L., Pevzner M.M., Naumov V.B., Babansky A.D. (2019) Characteristics of acid melts that produced the tephra of Pleistocene-Holocene eruptions of Ichinsky volcano, Kamchatka: Evidence from melt inclusions. *Geochem. Int.* **57**(3), 243-265.
- Федоров П.И., Коваленко Д.В., Баянова Т.Б., Серов П.А. (2008) Раннекайнозойский магматизм континентальной окраины Камчатки. *Петрология* (3), 277-295.
- Фролова Т.И., Плечов П.Ю., Тихомиров П.Л., Чураков С.В. (2001) Расплавленные включения в минералах алливалитов Курило-Камчатской островной дуги. *Геохимия* (4), 382-393.
- Frolova T.I., Plechov P.Y., Tikhomirov P.L., Churakov S.V. (2001) Melt inclusions in minerals of allivalites of the Kuril-Kamchatka island arc. *Geochem. Int.* **39** (4), 336-346.
- Хетчиков Л.Н., Пахомова В.А., Чашин А.А., Одариченко Э.Г. (2000) Особенности состава силикатных стекол расплавленных включений в минералах и основной массы пород вулкана Горелый (Южная Камчатка). *Труды ВНИИСИМС*, 322-336.
- Хетчиков Л.Н., Пахомова В.А., Попов В.К., Чашин А.А., Сапин В.И. (2000) Состав расплавленных включений в минералах и температурный режим формирования пород вулкана Дикий Гребень (Камчатка). *Тихоокеанская геология* **19**(4), 3-11.
- Хетчиков Л.Н., Чашин А.А., Пахомова В.А., Одариченко Э.Г. (2001) Вкрапленники плагиоклаза в базальтах вулканов Горелый и Мутновский (юг Камчатки) и условия их образования по данным изучения расплавленных включений. *Труды X Международной конференции по термобарогеохимии, Александров, ВНИИСИМС*, 111-140.
- Хубуная С.А., Соболев А.В. (1998) Первичные расплавы известково-щелочных магнезиальных базальтов Ключевского вулкана (Камчатка). *ДАН* **360**(1), 100-102.
- Хубуная С.А., Гонтовая Л.И., Соболев А.В., Низкоус И.В. (2007) Магматические очаги под Ключевской группой вулканов (Камчатка). *Вулканология и сейсмология* (2), 32-54.
- Шишкина Т.А., Плечов П.Ю., Портнягин М.В. (2009) Условия формирования оливин-плагиоклазовых кумулятов вулкана Ксудач (Камчатка). *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка* (1), 8-17.

- Auer S., Bindeman I., Wallace P., Ponomareva V., Portnyagin M. (2009) The origin of hydrous, high- δ O-18 voluminous volcanism: diverse oxygen isotope values and high magmatic water contents within the volcanic record of Klyuchevskoy volcano, Kamchatka, Russia. *Contrib. Mineral. Petrol.* **157**, 209-230.
- Benard A., Nebel O., Ionov D.A., Arculus R.J., Shimizu N., Metrich N. (2016) Primary silica-rich picrite and high-Ca boninite melt inclusions in pyroxenite veins from the Kamchatka sub-arc mantle. *J. Petrology* **57** (10), 1955-1982.
- Benard A., Koga K.T., Shimizu N., Kendrick M.A., Ionov D.A., Nebel O., Arculus R.J. (2017) Chlorine and fluorine partition coefficients and abundances in sub-arc mantle xenoliths (Kamchatka, Russia): Implications for melt generation and volatile recycling processes in subduction zones. *Geochim. Cosmochim. Acta* **199**, 324-350.
- Bindeman I.N., Ponomareva V.V., Bailey J.C., Valley J.W. (2004) Volcanic arc of Kamchatka: a province with high- ^{18}O magma sources and large-scale $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ depletion of the upper crust. *Geochim. Cosmochim. Acta* **68**, 841-865.
- Blundy J., Cashman K., Humphreys M. (2006) Magma heating by decompression-driven crystallization beneath andesite volcanoes. *Nature* **443**, 76-80.
- Churikova T., Dorendorf F., Wörner G. (2001) Sources and fluids in the mantle wedge below Kamchatka, evidence from across-arc geochemical variation. *J. Petrology* **42**(8), 1567-1593.
- Churikova T., Wörner G., Mironov N., Kronz A. (2007) Volatile (S, Cl and F) and fluid mobile trace element compositions in melt inclusions: implications for variable fluid sources across the Kamchatka arc. *Contrib. Mineral. Petrol.* **154**, 217-239.
- Dobretsov N.L., Simonov V.A., Kotlyarov A.V., Kulakov R.Yu., Karmanov N.S. (2016) Physicochemical parameters of crystallization of melts in intermediate supra-subduction chambers (by the example of Tolbachik and Ichinskii volcanoes, Kamchatka Peninsula). *Russian Geology and Geophysics* **57**(7), 993-1015.
- Edmonds M. (2015) Partitioning of light lithophile elements during basalt eruptions on Earth and application to Martian shergottites. *Earth Planet. Sci. Lett.* **411**, 142-150.
- GERM, Partition Coefficient (Kd) Database. <http://earthref.org/KDD/>
- Gill J. (1981) *Orogenic andesites and plate tectonics*. Springer, New York.
- Humphreys M.C.S., Blundy J.D., Sparks R.S.J. (2008) Shallow-level decompression crystallisation and deep magma supply at Shiveluch Volcano. *Contrib. Mineral. Petrol.* **155**, 45-61.
- Ionov D.A., Benard A., Plechov P.Y. (2011) Melt evolution in subarc mantle: evidence from heating experiments on spinel-hosted melt inclusions in peridotite xenoliths from the andesitic Avacha volcano (Kamchatka, Russia). *Contrib. Mineral. Petrol.* **162**, 1159-1174.
- Ishimaru S., Arai S., Ishida Y., Shirasaka M., Okrugin V.M. (2007) Melting and multi-stage metasomatism in the mantle wedge beneath a Frontal arc inferred from highly depleted peridotite xenoliths from the Avacha volcano, Southern Kamchatka. *J. Petrology* **48** (2), 395-433.
- Ishimaru S., Arai S. (2009) Highly silicic glasses in peridotite xenoliths from Avacha volcano, Kamchatka arc; implications for melting and metasomatism within the sub-arc mantle. *Lithos* **107**, 93-106.
- Izbekov P.E., Eichelberger J.C., Ivanov B.V. (2004) The 1996 eruption of Karymsky volcano, Kamchatka: historical record of basaltic replenishment of an andesite reservoir. *J. Petrology* **45** (11), 2326-2345.
- Kayzar T.M., Nelson B.K., Bachmann O., Bauer A.M., Izbekov P.E. (2014) Deciphering petrogenetic processes using Pb isotope ratios from time-series samples at Bezymianny and Klyuchevskoy volcanoes, Central Kamchatka Depression. *Contrib. Mineral. Petrol.* **168**, 1067.
- Kamenetsky V.S., Sobolev A.V., Joron A.V., Semet M.P. (1995) Petrology and geochemistry of Cretaceous ultramafic volcanics from Eastern Kamchatka. *J. Petrology* **36**(3), 637-662.
- Kamenetsky V.S., Zelenski M., Gurenko A., Portnyagin M., Ehrig K., Kamenetsky M., Churikova T., Feig S. (2017) Silicate-sulfide liquid immiscibility in modern arc basalt (Tolbachik volcano, Kamchatka): Part II. Composition, liquidus assemblage and fractionation of the silicate melt. *Chem. Geology* **471**, 92-110.
- Kobayashi M., Sumino H., Nagao K., Ishimaru S., Arai S., Yoshikawa M., Kawamoto T., Kumagai Y., Kobayashi T., Burgess R., Ballentine C.J. (2017) Slab-derived halogens and noble gases illuminate closed system processes controlling volatile element transport into the mantle wedge. *Earth Planet. Sci. Lett.* **457**, 106-116.
- Matveev S., Portnyagin M., Ballhaus C., Brooker R., Geiger C.A. (2005) FTIR spectrum of phenocryst olivine as an indicator of silica saturation in magmas. *J. Petrology* **46**(3), 603-614.
- McCulloch M., Gamble J. (1991) Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth Planet. Sci. Lett.* **102**(3-4), 358-374.
- Mironov N., Portnyagin M., Botcharnikov R., Gurenko A., Hoernle K., Holtz F. (2015) Quantification of the CO₂ budget and H₂O-CO₂ systematics in subduction-zone magmas through the experimental hydration of melt inclusions in olivine at high H₂O pressure. *Earth Planet. Sci. Lett.* **425**, 1-11.
- Neill O.K., Hammer J.E., Izbekov P.E., Belousova M.G., Belousova A.B., Clarke A.B., Voight B. (2010) Influence of pre-eruptive degassing and crystallization on the juvenile products of laterally directed volcanic explosions. *J. Volcan. Geotherm. Res.* **198**, 264-274.
- Nekrylov N., Portnyagin M.V., Kamenetsky V.S., Mironov N.L., Churikova T.G., Plechov P.Yu., Abersteiner A., Gorbach N.V., Gordeychik B.N., Krashenninnikov S.P., Tolbelko D.P., Shur M.Yu., Tetroeva S.A., Volynets A.O., Hoernle K., Wörner G. (2018) Chromium spinel in Late Quaternary volcanic rocks from Kamchatka: Implications for spatial compositional variability of subarc mantle and its oxidation state. *Lithos* **322**, 212-224.
- Pearce J.A., Parkinson I.J. (1993) Trace element models for mantle melting; application to volcanic arc petrogenesis. Prichard H.M., Alabaster T., Harris N.B.W., Neary C.R. (eds) *Magmatic processes and plate tectonics*. Geol. Soc. Special Publications. 1993. London: 373-403.
- Plechov P., Blundy J., Nekrylov N., Melekhova E., Shcherbakov V., Tikhonova M.S. (2015) Petrology and volatile content of magmas erupted from Tolbachik volcano, Kamchatka, 2012-13. *J. Volcan. Geotherm. Res.* **307**, 182-199.

- Ponomareva V., Portnyagin M., Derkachev A., Pendea F., Bourgeois J., Reimer P.J., Garbe-Schonberg D., Krashennikov S., Nurnberg D. (2013) Early Holocene M ~ 6 explosive eruption from Plosky volcanic massif (Kamchatka) and its tephra as a link between terrestrial and paleoenvironmental records. *Internat. J. Earth Sci.* **102**, 1673-1699.
- Ponomareva V., Portnyagin M., Pevzner M., Blaauw M., Kyle P., Derkachev A. (2015) Tephra from andesitic Shiveluch volcano, Kamchatka, NW Pacific: chronology of explosive eruptions and geochemical fingerprinting of volcanic glass. *Internat. J. Earth Sci.* **104**, 1459-1482.
- Ponomareva V., Bubenshchikova N., Portnyagin M., Zelenin E., Derkachev A., Gorbarenko S., Garbe-Schonberg D., Bindeman I. (2018) Large-magnitude Pauzhetka caldera-forming eruption in Kamchatka: Astrochronologic age, composition and tephra dispersal. *J. Volcan. Geotherm. Res.* **366**, 1-12.
- Portnyagin M., Hoernle K., Avdeiko G., Hauff F., Werner R., Bindeman I., Uspensky V., Garbe-Schonberg D. (2005) Transition from arc to oceanic magmatism at the Kamchatka-Aleutian junction. *Geology* **33**, 25-28
- Portnyagin M., Hoernle K., Plechov P., Mironov N., Khubunaya S. (2007) Constraints on mantle melting and composition and nature of slab components in volcanic arcs from volatiles (H₂O, S, Cl, F) and trace elements in melt inclusions from the Kamchatka Arc. *Earth Planet. Sci. Lett.* **255**, 53-69.
- Portnyagin M., Savelyev D., Hoernle K., Hauff F., Garbe-Schonberg D. (2008) Mid-Cretaceous Hawaiian tholeiites preserved in Kamchatka. *Geology* **36**(11), 903-906.
- Robertson K., Simon A., Pettke T., Smith E., Selyangin O., Kiryukhin A., Mulcahy S.R., Walker J.D. (2013) Melt inclusion evidence for magma evolution at Mutnovsky volcano. *Geofluids* **13**(4), 421-439.
- Shcherbakov V.D., Plechov P.Yu., Izbekov P.E., Shipman J.S. (2011) Plagioclase zoning as an indicator of magma processes at Bezymianny Volcano, Kamchatka. *Contrib. Mineral. Petrol.* **162**, 83-99.
- Shishkina T.A., Portnyagin M.V., Botcharnikov R.E., Almeev R.R., Simonyan A.V., Gebre-Schonberg D., Schuth S., Oeser M., Holtz F. (2018) Experimental calibration and implications of olivine-melt vanadium oxybarometry for hydrous basaltic arc magmas. *Amer. Mineral.* **103**(3), 369-383.
- Sobolev A.V., Chaussidon M. (1996) H₂O concentrations in primary melts from supra-subduction zones and mid-ocean ridges: Implications for H₂O storage and recycling in the mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.* **137**, 45-55.
- Sun S.-S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Magmatism in the ocean basins. Geol. Soc. London, Special Publ.* (Eds. Saunders A.D., Norry M.J.) (42), 313-345.
- Tolstykh M.L., Naumov V.B., Babanskii A.D., Khubunaya S.A., Kononkova N.N. (2000) Chemical composition, trace elements, and volatile components of melt inclusions in minerals from andesites of the Shiveluch volcano, Kamchatka. *Geochem. Int.* **38** (suppl. 1), 122-132.
- Urann B.M., Le Roux V., Hammond K., Marschall H.R., Lee C.-T.A., Monteleone B.D. (2017) Fluorine and chlorine in mantle minerals and the halogen budget of the Earth's mantle. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **172**, 51.
- Van den Bleeken G., Koga K.T. (2015) Experimentally determined distribution of fluorine and chlorine upon hydrous slab melting, and implications for F-Cl cycling through subduction zones. *Geochim. Cosmochim. Acta* **171**, 353-373.
- Volynets O.N. (1994) Geochemical types, petrology, and genesis of late Cenozoic volcanic rocks from the Kurile-Kamchatka island arc system. *Internat. Geol. Rev.* **36**, 373-405.
- Volynets A., Churikova T., Woerner G., Gordeychik B., Layer P. (2010) Mafic Late Miocene - Quaternary volcanic rocks in the Kamchatka back arc region: implications for subduction geometry and slab history at the Pacific-Aleutian junction. *Contrib. Mineral. Petrol.* **159**(5), 659-687.
- Watson B.F., Fujita K. (1985) Tectonic evolution of Kamchatka and the sea of Okhotsk and implications for the Pacific Basin. In *Tectonostratigraphic Terranes.* (ed. D. G. Howell), 333-348.
- Yogodinski G.M., Lees J.M., Churikova T.G., Dorendorf F., Worner G., Volynets O.N. (2001) Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges. *Nature* **409**, 500-504.