

УДК 551.2+552.11JEOI

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СПЕЦИФИКА МАГМАТИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ ВОСТОЧНОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПОЯСА И СРЕДИННОГО ХРЕБТА КАМЧАТКИ: АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗУЧЕНИЯ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

© 2024 г. М. Л. Толстых^{а, *}, В. Б. Наумов^{а, **}, А. В. Гирнис^{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: mashtol@mail.ru

**e-mail: naumov@geokhi.ru

***e-mail: girnis@igem.ru

Поступила в редакцию 12.07.2023 г.

После доработки 12.09.2023 г.

Принята к публикации 20.02.2024 г.

Сформированы выборки данных по составам стекол расплавных включений в минералах вулканитов Восточного вулканического пояса и Срединного хребта Камчатки. Выявлен дисбаланс между распространенностью пород и расплавов разной кремнекислотности, с преобладанием основных и средних составов среди пород и кислых — среди стекол расплавных включений. Проанализирован характер распределения значений концентраций петрогенных элементов и элементов-примесей. Выявлен набор элементов (Nb, легкие редкоземельные элементы), концентрации которых различаются в расплавах разных обстановок, а также подобраны отношения редких элементов в расплавах, наиболее четко демонстрирующие их геодинамическую принадлежность.

Ключевые слова: расплавные включения, Камчатка, Срединный хребет, Восточный вулканический пояс

DOI: 10.31857/S0203030624030031, EDN: JQNESQ

ВВЕДЕНИЕ

Как наиболее геологически активный регион России Камчатка вызывает постоянный интерес исследователей самого разного профиля — вулканологов, сейсмологов, тектонистов, геохимиков и петрологов. На сегодняшний день накоплен колоссальный объем данных по составам пород, минералов и породообразующих сред. На основе материалов из базы данных по составам расплавных включений и остаточных стекол [Наумов и др., 2010], которая на сегодняшний день насчитывает 2 600 000 анализов, были проведены сравнения расплавов включений в минералах и закалочных стекол всей Камчатки [Наумов и др., 2020]

с усредненными характеристиками разных геодинамических обстановок — островных дуг и активных окраин [Наумов и др., 2017, 2019]. Однако геологическая история полуострова чрезвычайно сложна и многостадийна, и даже камчатский вулканизм четвертичного периода характеризуется сочетанием как минимум двух геодинамических обстановок, обусловивших одновременную активность Восточного вулканического пояса (ВВП) и Срединного хребта (СХ) [Авдейко и др., 2006; Park, 2002]. Задачей этой работы стала попытка выявить специфические особенности составов породообразующих расплавов этих крупнейших структур полуострова, используя массив опубликованных

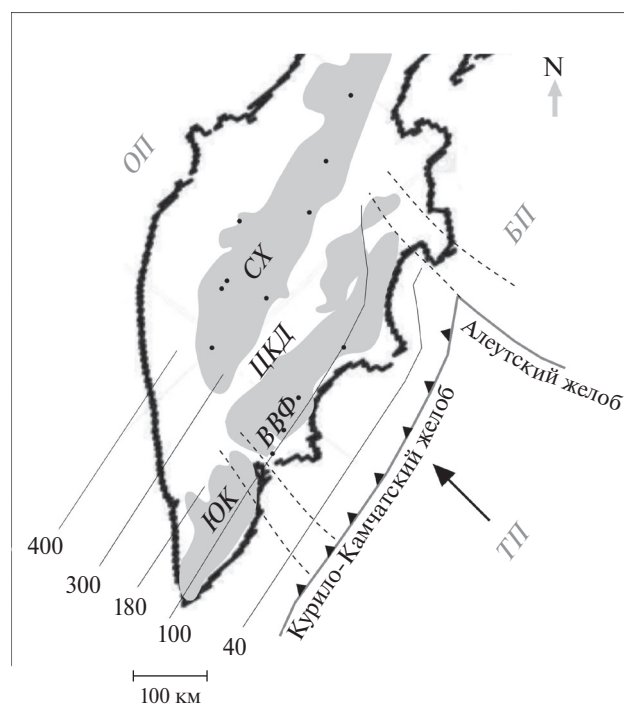


Рис. 1. Схема полуострова Камчатка.

ОП, ТП, БП — литосферные плиты Охотская, Тихоокеанская, Берингская, СХ — Срединный хребт Камчатки, ЦКД — Центральная-Камчатская депрессия, ВВФ — Восточный вулканический фронт, ЮК — Южная Камчатка.

Серыми полями обозначены неоген-четвертичные вулканические пояса Камчатки. Точками обозначено расположение вулканических центров, данные по которым использованы в работе. Пунктирные линии ограничивают Малко-Петропавловскую (на юге) и Берингскую (на севере) разломные зоны [Авдейко и др., 2006]. Сплошные тонкие линии — показатели глубины поверхности погружающейся плиты, по [Gorbatov et al., 2001].

данных по составам расплавных включений в минералах.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА

Камчатский полуостров — фрагмент Курило-Камчатской островной дуги (ККОД), приуроченной к конвергентной границе Тихоокеанской и Евразийской литосферных плит. Активность островной дуги, как сейсмическая, так и вулканическая, определяется субдукцией океанической плиты. Своеобразие геодинамики Камчатки и в том, что в северной части Камчатки расположена Берингская зона трансформных разломов (рис. 1), приуроченных к границе Тихоокеанской плиты

и Берингского блока Северо-Американской плиты [Шапиро, Ландер, 2003; Шапиро, Соловьев, 2009; Yagodinski, 2001; Park, 2002 и др.]. Южная часть полуострова, ограниченная Малко-Петропавловской разломной зоной (см. рис. 1), считается продолжением Курильской ветви Курило-Камчатской островной дуги [Авдейко и др., 2006].

В Камчатском сегменте Курило-Камчатской островной дуги можно выделить глубоководный желоб, вулканический пояс и задуговой прогиб. Скорость субдукции оценивается как 7.6 см/г [Avdeiko et al., 2007]. Плоскость сейсмо-фокальной зоны (СФЗ), падающая под углом около 40°, согласно сейсмическим данным, прослеживается до 600 км на глубину [Кулаков и др., 2011]. Мощность коры полуострова меняется с запада на восток от 20 км под Срединным хребтом до 40 км в районе Центрально-Камчатской депрессии [Балеста и др., 1999]. Наличие в структуре Камчатки мощных блоков континентальной коры определяется мозаичным строением полуострова, который сложен серией сочлененных аккреционных комплексов и террейнов мезозойского возраста [Сухов и др., 2016], в том числе континентального и окраинно-морского происхождения, а также древним метаморфическим массивом [Цуканов, 2020].

На территории Центральной и Северной Камчатки выделяют две крупные субмеридиональные структуры, с которыми связана вулканическая активность — Срединный хребт на западе и Восточный вулканический пояс на востоке (например, [Nekrylov et al., 2021]), в состав которого входит Восточный вулканический фронт и Центральная-Камчатская депрессия (см. рис. 1).

Вулканизм Восточного вулканического пояса обусловлен современными субдукционными процессами и имеет все характеристики типично островодужной системы, при некоторых различиях режимов магмогенерации в пределах ВВФ и ЦКД [Duggen et al., 2007; Portnyagin et al., 2007]. Согласно [Авдейко и др., 2006 и др.], Срединный хребт в неогеновое время также функционировал как классическая островная дуга, вулканизм которой определялся субдукционными процессами; глубоководный желоб тогда находился западнее своего нынешнего положения. Около 7–2 млн лет назад процесс

погружения Тихоокеанской плиты под Евразийскую был заторможен последовательным приращением к восточному побережью нынешней Камчатки фрагментов Кротоцкой палеодуги, которые сейчас известны как полуострова Шипунский, Кротоцкий и Камчатский мыс. В результате этих тектонических процессов ось субдукции переместилась на восток, заложился новый глубоководный желоб и новый современный вулканический пояс (Восточный вулканический пояс, ВВП). Однако и на Срединном хребте вулканизм не затухает по сей день. Существует несколько гипотез, объясняющих этот феномен, среди них — влияние флюидных потоков, связанных с современными субдукционными процессами [Churikova et al., 2001], плавление погружающегося фрагмента плиты в области так называемого “окна слэба” [Portnyagin et al., 2007], спрединг задугового прогиба с вовлечением астеносферного компонента [Колосков и др., 2013; Давыдова и др., 2019], дегидратация нижней коры и дегидратация погружающихся фрагментов в качестве источника флюида [Nekrylov et al., 2018, 2021a].

Таким образом, в плейстоцен-голоценовый процесс магмогенерации на Камчатке могут вовлекаться разнообразные компоненты: базиты и осадочные толщи погружающейся Тихоокеанской плиты, деплетированный мантийный клин, метасоматизированная мантия, нижняя и верхняя кора, а также астеносфера. Вероятно, такое разнообразие источников и возможность разной степени их плавления обусловили разнообразие магматических пород Камчатки, в том числе довольно экзотических, например, пикробазальтов или трахитов.

МЕТОДИКА РАБОТЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выбор данных

Из массива данных по расплавам и остаточным стеклам камчатских вулканитов, насчитывающего более 9650 анализов (см. [Наумов и др., 2020] и ссылки в статье; [Nekrylov et al., 2018, 2021; Volynets et al., 2024; Tolstykh et al., 2020]) были выбраны значения, характеризующие расплавные включения четвертичных вулканов Восточного вулканического фронта (центральный и северный сегменты), Центральной Камчатской депрессии и Срединного хребта (см. рис. 1).

В данном исследовании мы не рассматриваем вулканы Южной Камчатки, поскольку область полуострова южнее Малко-Петропавловской зоны разломов относится к Курильскому фрагменту Курило-Камчатской островной дуги, который характеризуют иные геодинамические условия. Также в выборку не включены данные по древним вулканическим и плутоническим массивам Камчатки. Список объектов, данные по которым используются в исследовании, приведен в табл. 1.

Сравнение выборок составов расплавных включений в минералах вулканитов Камчатки, валовых составов пород (база данных GEOROCK, <https://georoc.eu/georoc/new-start.asp>) и стекол тефры камчатских вулканов (база данных TephraKam [Portnyagin et al., 2020]) выявило резкие различия в распределении содержаний SiO_2 : изобилие средних пород сочетается с абсолютным преобладанием кислых составов стекол (рис. 2). Конечно, оценки параметров распределения могут быть смещенными, поскольку в выборках для Камчатки задействовано относительно небольшое количество работ. Однако редкость расплавов среднего состава хорошо соотносится с глобальными статистическими характеристиками составов расплавных включений и остаточных стекол, фиксирующими бимодальное распределение составов с минимумом в андезитовой области [Наумов и др., 2004, 2010, 2024], а также с данными по составам криптефры [Lowe et al., 2017 и др.], стекла которой имеют, чаще всего, кислый состав. То, что среди пород максимально распространены андезибазальты и андезиты с содержаниями SiO_2 52–62 мас. %, а среди расплавов — кислые разности (>72 мас. % SiO_2), может свидетельствовать о распространенности процессов кумуляции и магматического смешения [Наумов и др., 1997; Halsor, 1989; Pal et al., 2007; Hodge, Jellinek, 2020 и др.]. Например, имеется масса свидетельств преобладания в минералах андезитов магматических включений дацит-риолитового состава [Schiano et al., 1995; Straub et al., 2011; Humphreys et al., 2006, 2008; Толстых и др., 2015 и др.].

Для данной работы важно то, что валовой состав породы и состав порообразующего расплава часто не идентичны, поэтому при всем обилии геохимических исследований

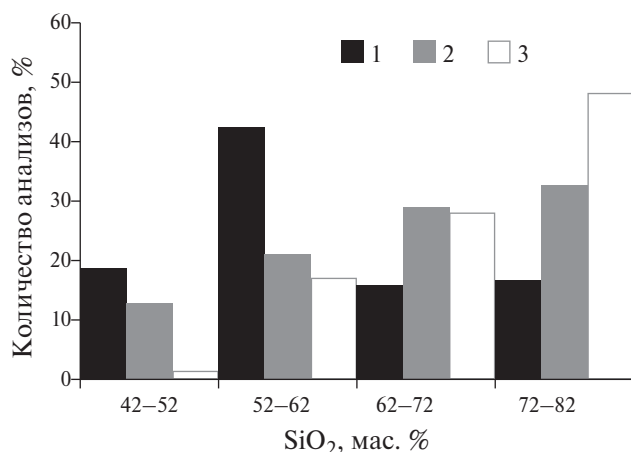


Рис. 2. Распределение пород и расплавов Камчатки по кремнекислотности.

1 – составы пород (GEOROCK, 4064 анализа), 2 – составы расплавных включений ([Наумов, 2010], 9596 анализов), 3 – составы стекол тефры ([Portnyagin et al., 2020], 7048 анализов).

вулканитов Камчатки ВВП и СХ [Churikova et al., 2001; Volynets et al., 2010; Волюнец и др., 2018; Давыдова и др., 2019 и др.] полезно выявить характеристические критерии и для пороодообразующих расплавов, формировавшихся в обстановках Восточного пояса и Срединного хребта. Что касается составов остаточных стекол, то обширнейшая база данных по составам стекол тефры вулканов Камчатки TephraKam [Portnyagin et al., 2020], на материале которой были проведены масштабные сопоставления стекол камчатских вулканов ЦКД, ВВФ и СХ, содержит, в основном, вариации кислых расплавов; доля основных стекол в этой базе данных минимальна (см. рис. 2). Таким образом, при всей масштабности накопленных данных по валовым составам пород и стекол тефры вулканов Камчатки анализ массива данных по расплавным включениям продолжает оставаться актуальным.

С использованием базы данных была сформирована выборка составов гомогенных закаленных стекол расплавных включений в разных пороодообразующих минералах – оливинах, пироксенах, амфиболах, плагиоклазах, кварце и даже рудных фазах. Содержания макрокомпонентов, как правило, получены на электронном микроанализаторе (EPMA), а содержания элементов-примесей измерены с помощью ионного зонда (SIMS) или масс-спектрометра с пробоотбором методом лазерной абляции (LA).

В ряде работ приведены подробные описания аналитических методик и упомянуто использование в качестве эталонов синтетических и природных стекол, анализы которых представлены в работах [Jochum et al., 2000, 2005; Danyushevsky et al., 2000; Sobolev, Chaussidon, 1996 и др.].

Статистическая обработка данных

Все данные по составам стекол расплавных включений были разделены на два главных блока – включения в минералах вулканитов Восточного вулканического пояса (ВВП; к сожалению, разграничить составы расплавов Восточного фронта и Центрально-Камчатской депрессии не удается из-за недостатка данных) и Срединного хребта (СХ). В каждом из этих блоков расплавы скомпонованы по кремнекислотности: основные (<53 мас. % SiO₂), средние (53–63 мас. %) и кислые (>63 мас. %). Усредненные содержания петрогенных и летучих компонентов, а также элементов-примесей в основных, средних и кислых расплавах ВВП и СХ приведены в табл. 2.

Статистический анализ массивов данных для каждой категории (расплавы основного, среднего и кислого составов ВВП и СХ) показал, что для подавляющей части химических элементов, включая даже наиболее проблематичный параметр для измерения в природных стеклах – содержание Na₂O [Nielsen, Sigurdsson, 1981; Borisova, 2022], характерно субнормальное распределение значений, поэтому для описательной статистики использовалось среднее арифметическое. Однако есть и исключения. Так, для основных расплавов как ВВП, так и СХ для содержаний MgO и Ni характерны заметные расхождения в параметрах моды, медианы и среднего значения, превышающее величину стандартного отклонения. В расплавах среднего состава СХ такие же отклонения от симметричного распределения также демонстрирует MgO, и, в меньшей степени, SiO₂. Тем не менее, поскольку таких компонентов всего два, для них мы также приводим средние арифметические значения.

К сожалению, данные по содержаниям летучих компонентов – H₂O, F, Cl, S – для каждой категории демонстрируют крайне высокую дисперсию и асимметричный характер распределения значений, что, вероятно, связано

Таблица 1. Вулканические центры Камчатки, рассматриваемые в статье

Срединный хребет	Обр.	Восточный вулканический пояс	Обр.
Ахтанг	Л	Авачинский	Л, Т
Ичинский	Л, Т	Шивелуч	Л, Т
Хангар	Т	Безымянный	Л, Т
Кекукнайский	Т	Камень	Л
Моногенный центр Черпук*	Т	Ключевской	Л, Т
Тобельцен*	Т	Карымский	Л, Т
Вулканы Тигильского дола**	Л	Жупановский	Л, Т
Конус LP*	Т	Толбачик	Л
Пирокластический поток р. Ича***	Т	Семячик	Л

Примечания. * – [Nekrylov et al., 2021]; ** – [Volynets et al., 2024]; *** – [Толстых и др., 2020]. Ссылки на работы по остальным вулканическим центрам приведены в работе [Наумов и др., 2020]. Л, Т – типы пород, включения в минералах которых анализировались: Л – лавы, Т – тефра.

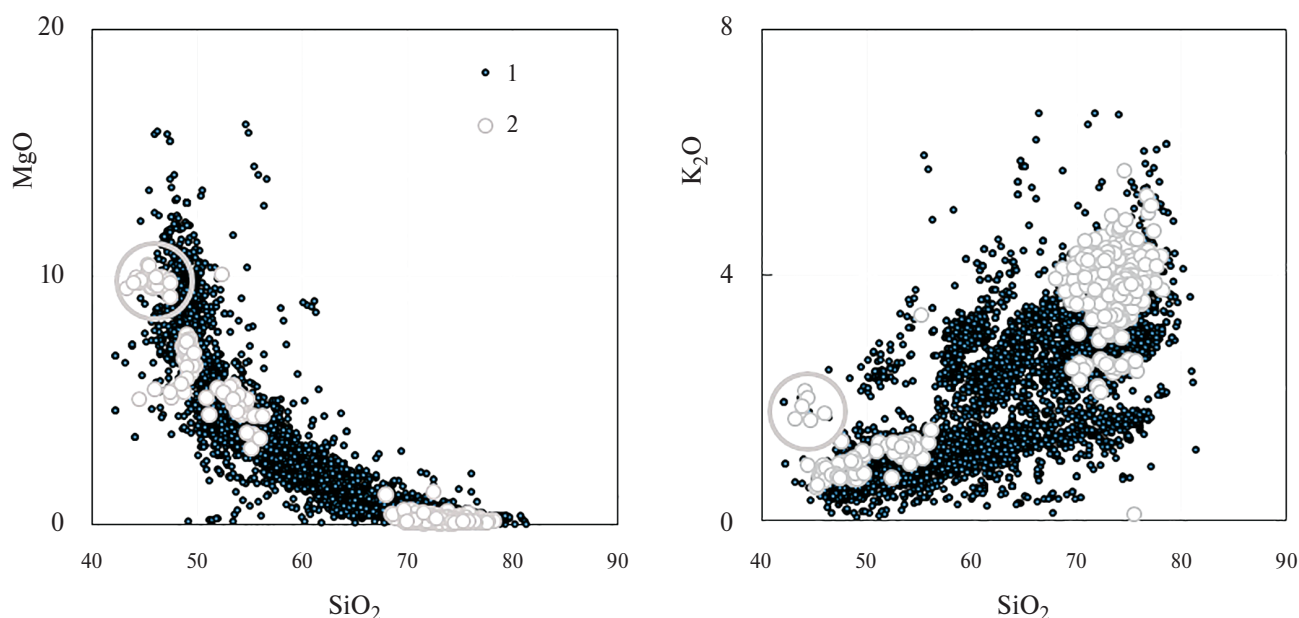


Рис. 3. Бинарные диаграммы MgO–SiO₂ и K₂O–SiO₂ для расплавов Восточного вулканического пояса (1) и Срединного хребта (2).

В больших кружках – расплавы высокомагнезиальных расплавов центра Большой Тигиль.

с методическими сложностями измерений, а также вероятной потерей летучих при гомогенизации стекол. Поэтому при анализе материалов по расплавам из разных зон Камчатки эти компоненты оказались мало информативными.

В дальнейшем основное внимание будет уделено микрокомпонентному составу расплавов, чему есть несколько причин. Во-первых, многие авторы приводят не исходные измерения, а реконструированные составы захваченных расплавов, с учетом различных типов

постзахватных изменений: кристаллизации кайм и диффузионных процессов [Ford, 1993; Danyushevsky, Plechov, 2011], потери летучих и кремнезема [Portnyagin et al., 2019; Gavrilenko et al., 2016] и т.д. Возможно, асимметричные распределения концентраций MgO и SiO₂ в массивах характеристик базальтовых и андезибазальтовых расплавов могут быть объяснены именно разнообразными пересчетами. Учитывая реальную точность анализа, содержания редких элементов даже в случае пересчетов меняются не значительно.

Таблица 2. Средние содержания петрогенных и летучих компонентов, а также элементов-примесей в основных, средних и кислых расплавах ВВП и СХ

N	Расплавы ВВП			Расплавы СХ		
SiO ₂	49.76	58.42	71.28	48.00	54.19	73.64
σ	1.95	2.92	3.76	1.97	1.56	2.24
TiO ₂	1.07	1.21	0.49	1.39	1.18	0.21
σ	0.31	0.34	0.32	0.29	0.25	0.11
Al ₂ O ₃	16.45	15.74	13.63	17.43	18.15	12.53
σ	2.11	1.51	1.40	1.42	0.91	1.22
FeO	8.52	7.45	2.31	8.38	7.56	0.97
σ	1.94	1.88	1.50	1.98	1.33	0.46
MnO	0.14	0.15	0.07	0.12	0.15	0.06
σ	0.05	0.05	0.05	0.04	0.02	0.04
MgO	7.11	2.84	0.54	7.53	4.80	0.21
σ	2.65	1.31	0.47	1.85	0.73	0.26
CaO	10.94	5.98	1.93	11.31	7.66	0.91
σ	2.32	1.50	1.15	2.71	0.87	0.65
Na ₂ O	3.12	4.00	4.32	3.60	3.61	3.26
σ	0.69	0.64	0.68	0.29	0.60	0.65
K ₂ O	0.83	1.85	2.76	0.93	1.34	3.87
σ	0.43	0.96	0.76	0.35	0.54	0.62
P ₂ O ₅	0.20	0.38	0.11	0.34	0.46	0.10
σ	0.15	0.24	0.12	0.15	0.09	0.12
Cl	0.10	0.09	0.10	0.05	0.05	0.09
σ	0.03	0.05	0.05	0.01	0.01	0.07
F	0.00	0.04	0.02	0.07	0.10	0.09
σ	0.04	0.04	0.03	0.02	0.23	0.06
S	0.17	0.05	0.02	0.14	0.16	0.04
σ	0.90	0.07	0.01	0.03	0.05	0.02
H ₂ O	2.02	2.34	2.82	1.55	1.98	3.73
σ	1.38	1.12	1.65	0.28	0.52	1.74
N	3148			379		
Li	15.73	11.51	36.69	8.04	10.77	33.83
σ	116.07	5.01	24.63	2.04	2.50	9.54
Be	0.55	3.05	1.66	1.26	1.41	1.79
σ	0.15	6.12	2.26	0.42	0.71	0.30
B	13.58	12.37	59.17	4.53	3.48	24.98
σ	4.37	5.23	26.40	1.82	1.05	6.89
Y	20.43	21.22	8.86	22.56	23.56	9.72
σ	4.58	8.72	7.55	2.53	3.10	4.17
La	5.54	7.34	9.39	14.31	15.91	16.05
σ	2.15	3.32	2.62	8.49	2.53	3.60
Ce	13.40	19.43	19.71	34.71	37.73	30.07
σ	3.73	8.99	6.87	22.15	5.67	7.51
Pr	—	—	2.02	5.20	5.11	17.47
σ	—	—	0.52	3.40	0.67	9.81
Nd	11.30	13.14	9.13	21.54	22.64	10.59
σ	17.74	5.98	4.60	13.25	3.62	2.99

Таблица 2. Окончание

Sm	3.06	3.71	1.93	4.74	5.24	1.84
σ	0.85	1.61	1.26	1.68	0.88	0.66
Eu	1.07	1.11	0.99	1.67	1.59	0.51
σ	0.42	0.38	0.99	0.45	0.25	0.31
Gd	3.72	3.75	2.72	4.98	5.12	2.71
σ	1.04	1.61	1.67	1.49	0.88	2.10
Dy	3.36	3.73	2.24	4.21	4.31	1.61
σ	0.74	1.55	1.53	0.63	0.59	0.64
Er	2.18	2.57	1.64	2.59	2.52	1.23
σ	0.55	1.16	1.06	0.60	0.42	0.50
Yb	2.04	2.67	1.71	2.06	2.19	1.50
σ	0.53	1.01	1.06	0.47	0.33	0.59
Lu	—	0.16	0.23	0.30	0.33	—
σ	—	0.02	0.04	0.09	0.06	—
Rb	18.09	25.63	46.59	6.80	15.34	73.28
σ	2.02	14.55	16.35	2.30	2.25	23.33
Sr	317.64	350.15	166.79	576.36	581.79	159.05
σ	79.04	74.98	39.94	103.03	60.52	—
Ba	253.97	327.07	605.78	255.10	453.95	859.38
σ	89.77	134.88	167.20	165.29	53.68	208.55
Cr	304.80	2101.20	1570.92	273.34	138.01	1.68
σ	372.43	416.35	355.52	615.43	43.27	1.34
Ni	187.60	—	—	36.93	59.99	—
σ	128.02	—	—	22.32	44.61	—
Zr	69.75	99.32	179.30	120.96	145.59	84.52
σ	25.63	54.80	64.33	30.72	24.05	43.36
Hf	2.02	3.08	3.35	3.16	3.28	2.82
σ	0.53	1.44	1.56	0.58	0.57	1.00
Nb	1.75	2.57	3.53	7.77	8.83	11.29
σ	0.95	1.23	1.43	2.32	1.93	4.06
Ta	—	0.97	0.67	0.54	0.49	1.19
σ	—	0.10	0.29	0.14	0.10	0.36
Th	0.50	0.89	2.44	0.93	1.21	6.37
σ	0.29	0.54	1.23	0.43	0.37	2.06
U	0.32	0.69	1.51	0.44	0.56	3.47
σ	0.17	0.38	0.84	0.30	0.19	1.17
Cu	145.61	189.63	137.66	66.38	—	26.17
σ	35.95	34.37	103.93	31.17	—	7.54
Pb	2.29	4.28	6.30	2.70	5.26	5.49
σ	1.61	2.11	3.57	1.71	1.55	1.69
N	227			122		
N	149	55	23	74	21	27

Примечание. N — количество анализов включений, σ — стандартное отклонение.

Во-вторых, поля расплавов ВВП и СХ перекрываются (рис. 3) по всем петрогенным компонентам; следовательно, их содержания не могут служить специфическими петрогенетическими характеристиками. Исключением можно почитать только высокомагнезиальные ультраосновные расплавы, обогащенные калием (см. рис. 3, точки в кружке), однако эти уникальные

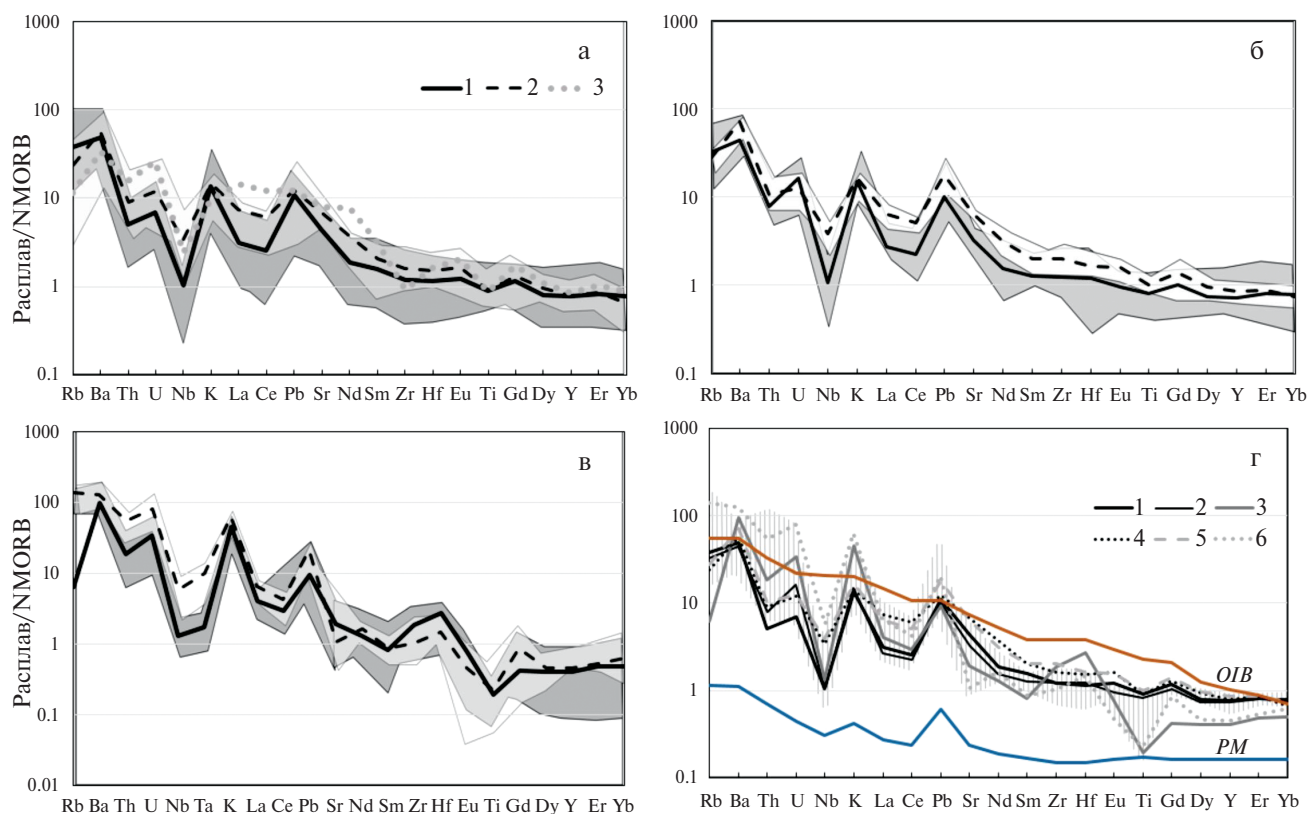


Рис. 4. Спайдер-диаграммы для усредненных составов расплавов ВВП и СХ.

Расплавы: а – основного; б – среднего; в – кислого составов; г – сводный график. Серое и белое поля на рис. (а–в) – все данные по расплавам ВВП и СХ соответственно, поле со штриховкой на рис. (г) – поле расплавов островных дуг и активных окраин [Наумов и др., 2024].

Линии на графиках (а–в): 1 – расплавы ВВП; 2 – расплавы СХ; 3 – уникальные расплавы центра Большой Тигиль в Срединном хребте; на графике (г): 1, 3, 5 – расплавы ВВП; 2, 4, 6 – расплавы СХ основного, среднего и кислого составов соответственно. Составы примитивной мантии (PM) и базальтов океанических островов (OIB) приведены по [Sun, McDonough, 1989].

породы [Volynets et al., 2023] были обнаружены пока на единственном эруптивном центре Большой Тигиль в пределах СХ.

Анализ данных по содержаниям элементов-примесей

Анализ данных по содержаниям микроэлементов осложняется тем, что в работах разных авторов, выполненных в разных лабораториях в разное время, приведены анализы разного набора компонентов. Например, многие анализы стекол не содержат данных о количествах Pb и Ta. Однако в большинстве случаев микроэлементные составы стекол показательны в качестве индикаторов принадлежности к ВВП или СХ (см. табл. 2).

Наиболее значимые различия демонстрируют, в первую очередь, содержания Nb, заметно

более высокие в расплавах СХ (1.7–3.5 и 7.7–11.3 ppm для ВВП и СХ соответственно), и, в меньшей степени, Ta (0.17–0.67 и 0.54–1.19 соответственно). Причем на остальные высокотоксичные элементы группы (HFSE: Zr, Hf) эта закономерность не распространяется, они практически идентичны в расплавах фронтальной и тыловой зоны дуги. Также в расплавах СХ всех категорий (от основных до кислых) выше содержания легких лантаноидов (сумма редкоземельных элементов, РЗЭ, от La до Nd составляет 30–38 и 56–75 ppm для ВВП и СХ соответственно). Тяжелые РЗЭ не демонстрируют столь заметной разницы (Σ Sm–Yb 11–18 и 8–20 ppm в ВВП и СХ соответственно). Кроме того, расплавы СХ несколько богаче U и Th, а расплавы ВВП – сидерофильными компонентами и хромом.

В целом, характер спайдер-диаграмм для всех типов расплавов обеих обстановок чрезвычайно схож (рис. 4). Для каждой из них характерен резко выраженный Nb-минимум, высокие концентрации Ba, K, Pb и слабое обеднение тяжелыми РЗЭ относительно легких (La/Yb растёт от 2.7 до 5.5 от основных к кислым расплавам ВВП, от 6.9–10.7 от основных к кислым расплавам СХ). Наиболее заметное отличие одноименных расплавов ВВП и СХ заключается именно в глубине Nb-минимума, поскольку в расплавах СХ этот дефицит проявлен несколько меньше (усредненные значения La/Nb составляют 3.1 и 1.5 для расплавов ВВФ и СХ соответственно).

Расплавы дацит-риолитового состава по сравнению с основными разностями характеризуются заметным обогащением наиболее некоррелируемыми LILE и легкими РЗЭ, Hf, Th и U (при сохранении Th/U отношения), менее выраженным отрицательным экстремумом Nb, обеднением Sr, а также средними и тяжелыми РЗЭ относительно основных разностей. Еще одно существенное отличие кислых расплавов от базитовых — дефицит Ti в кислых расплавах.

Нужно отметить сходные тенденции у расплавов разных обстановок: по мере роста кремнекислотности уменьшается глубина Nb-минимума, растут содержания наиболее несовместимых компонентов и уменьшаются концентрации Ti, Sr и тяжелых РЗЭ. Дефицит Ti можно объяснить фракционированием рудной фазы [Moore, Carmichael, 1998], а дефицит Sr — фракционированием плагиоклаза. Недостаток тяжелых РЗЭ может быть результатом фракционирования амфиболов и пироксенов [Sisson, 1991, 1994; Klein, 1997]. Однако, в целом, если кривые основных и средних расплавов ВВП и СХ на графиках располагаются субпараллельно, с легким равномерным обогащением более дифференцированных составов, то кривые кислых расплавов сочетанием достаточно резких экстремумов в области LILE, Th, U, Hf и минимумов Ti и Sr, резко отличаются от более основных разностей. Это предполагает формирование кислых расплавов не только при дифференциации основных расплавов, но и за счет комплекса петрогенетических процессов, включая частичное плавление фрагментов погружающейся плиты [Portnyagin et al., 2007]

или частичное плавление коровых базитов под влиянием флюидного компонента [Добрецов и др., 2012].

Среди всех расплавов обеих обстановок резко выделяются высокомагнезиальные расплавные включения в оливинах пикробазальтов вулканического центра Большой Тигиль (см. рис. 3, 4а). Чрезвычайно высокая степень обогащенности легкими редкоземельными элементами может быть объяснена локальным плавлением специфического метасоматизированного субстрата, чьи характеристики нельзя считать напрямую обусловленными геодинамической позицией вулканического центра и его принадлежностью к СХ [Volynets et al., 2023]. Уникальность этих составов предполагает исключение их из общей выборки данных при ее статистическом анализе.

На сводной спайдер-диаграмме (см. рис. 4г) нанесены, помимо усредненных составов всех групп расплавов, линии магматических источников — примитивной мантии и OIB, по [Sun, McDonough, 1989], а также поле составов расплавов субдукционных обстановок (островных дуг и активных окраин), а также линия усредненных составов расплавов задуговых бассейнов [Наумов и др., 2023]. Все данные по Камчатке укладываются в это достаточно ограниченное поле составов, за исключением несколько более высокого содержания ниобия в кислых расплавах Срединного хребта.

На сводной спайдер-диаграмме, наряду с усредненными составами расплавов ВВП и СХ, нанесены нормативные составы пород, отвечающих магматическим источникам РМ и OIB [Sun, McDonough, 1989]. Традиционно во многих геохимических работах [Churikova et al., 2001 и др.] относительную обогащенность вулканитов СХ принято объяснять вовлечением в магомгенезис обогащенного источника типа OIB — более глубинных частей мантийного клина. Однако не совсем очевидно, как характеристики этого нормативного состава могут обусловить избирательный рост концентраций отдельных элементов в расплавах СХ относительно расплавов ВВП.

В целом же соотношения кривых ВВП и СХ на спайдер-диаграммах чрезвычайно схожи с соотношениями пород фронтальной и тыловой дуг для разных фрагментов Тихоокеанского

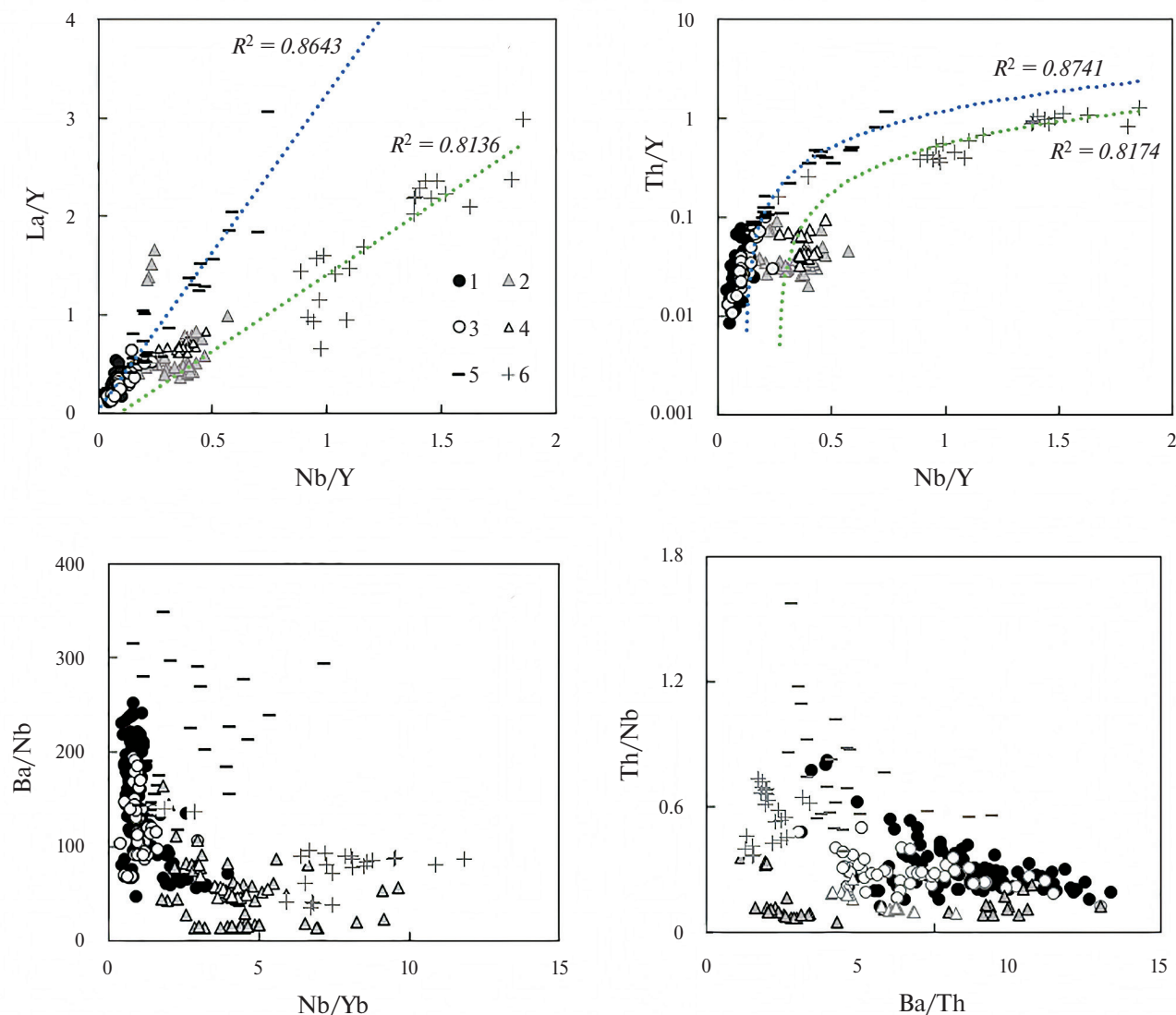


Рис. 5. Бинарные диаграммы отношений элементов-примесей для расплавов ВВП и СХ Камчатки. 1, 3, 5 – основные, средние и кислые расплавы ВВП; 2, 4, 6 – основные, средние и кислые расплавы СХ.

кольца [Pearce, Stern, 2006], однако на описанных в этой работе островных дугах (Изу-Бонинская, Тонга, Скотия, Алеутская, Марианская и др.) диапазон концентраций ниобия заметно больше, чем на Камчатке; кроме того, для пород тыловой зоны характерно повышение концентраций прочих высоkozарядных элементов. Возможно, такие различия связаны с тем, что все вышеперечисленные объекты, в отличие от Камчатки, относятся к классическим энсиматическим островным дугам.

Поиск характеристических критериев для расплавов ВВП и СХ

В основном, на бинарных диаграммах отношений редких элементов, традиционно

используемых в геохимии в качестве маркеров обстановок и источников магмогенерации, составы расплавов ВВП и СХ представляют собой два накладывающихся друг на друга облака точек.

Наиболее приемлемыми для всего массива данных оказываются диаграммы, принятые для разделения вулканитов фронтальной и тыловой дуг [Pearce et al, 1995; Pearce, Stern, 2006; Duggen et al., 2007]. Впрочем, многие из них также затруднительно использовать для Камчатки в силу ее сложной геологической истории и структуры, поскольку этот вулканически активный район сочетает в себе признаки энсиматической островной дуги и активной

континентальной окраины, в строении полуострова принимают участие разновозрастные и разнотипные террейны и палеодуги, и, кроме того, ситуация осложняется вероятным “перескоком” оси субдукции на восток и деструкцией слэба [Авдейко и др., 2006; Portnyagin et al., 2007]. Однако в некоторых случаях диаграммы отношений редких элементов в расплавах СХ и ВВП оказываются репрезентативными (рис. 5). Несмотря на то, что большинство этих диаграмм изначально предназначались для характеристик магматического источника, используемые для них критерии могут быть показательны не только для базитов, но и для более дифференцированных расплавов. На диаграмме Nb/Y–La/Yb различия в области основных расплавов не слишком значительны, однако можно отметить, что расплавы СХ имеют несколько более высокие значения этих отношений, характеризующих степень деpletированности мантийного источника [Pearce et al., 1995]. Что же касается кислых составов, то для них эти параметры могут быть соотнесены с масштабностью процессов фракционирования амфибола [Brophy, 2005; Portnyagin, 2021], и в этом случае фиксируют совершенно различные тренды фракционирования для фронтальных (ВВП) и тыловых (СХ) вулканов (см. рис. 5а, 5б). На рис. 5а особняком лежит поле точек обогащенных лантаном базитовых расплавов СХ; эти точки соответствуют расплавам уникального центра Большой Тигиль, о котором говорилось выше. Расположение же прочих точек основных и средних расплавов характеризуется высокой локализованностью.

Субдукционный компонент, представленный отношением Ba/Nb [Pearce et al., 1995], предсказуемо выше в расплавах ВВП (см. рис. 5в, 5г), в то время как маркер задуговой обстановки Nb/Yb [Pearce, Stern, 2006] повышен в расплавах СХ. Причем если в расплавах основного состава различия минимальны, то для расплавов дацит-риолитового состава эти расхождения принципиальны, характеризуя, опять-таки, не столько особенности источника магмогенерации, сколько векторы фракционирования, в первую очередь, амфибола и пироксенов, которые могут выступать в качестве концентраторов некогерентных элементов. Для кислых расплавов ВВП характерен очень большой разброс

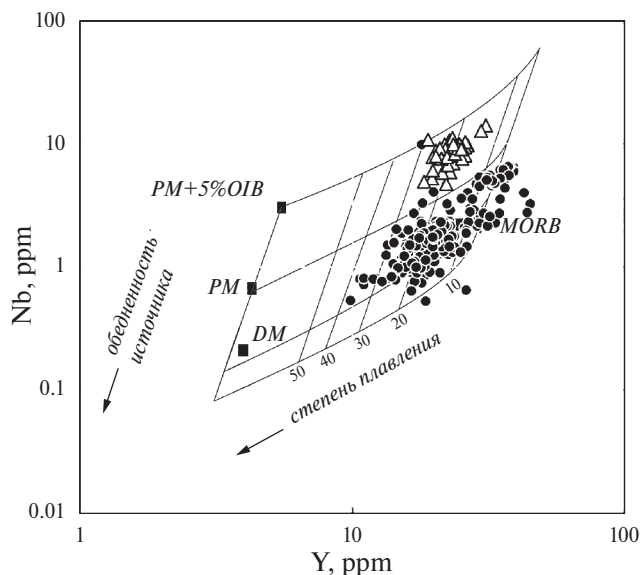


Рис. 6. Бинарная диаграмма Y–Nb для основных расплавов.

Маркеры расплавов ВВП и СХ те же, что и ранее. Значения DM, PM (мантия деплетированная и примитивная), OIB (базальты океанических островов), N-MORB (базальты срединно-океанических хребтов) приведены, по [Portnyagin et al., 2007].

значений, который подтверждается и данными работы по стеклам тефры [Portnyagin et al., 2020].

Отношение Ba/Th, которое принято связывать с присутствием субдукционного флюида [Plank, 2005], неравномерно распределено для базитовых расплавов СХ — выделяется группа точек с аномально низкими значениями этих величин (см. рис. 5г); к ним относятся не только вышеупомянутые уникальные базиты центра Большой Тигиль, но и расплавы Кекукнайского массива. Фигуративные точки этих расплавов вообще максимально приближены к центру координат (см. рис. 5г), что может трактоваться как минимальное присутствие следов субдукционного участия в процессах магмогенеза. Эти расплавы на основании измерения количества летучих в стекле были реконструированы [Nekrylov et al., 2018, 2022] как мантийные выплавки, генетически связанные с деляминацией нижней коры.

К сожалению, все вышеприведенные характеристики наиболее показательны для кислых расплавов; расплавы основного и среднего состава СХ и ВВП дифференцировать с их помощью довольно трудно.

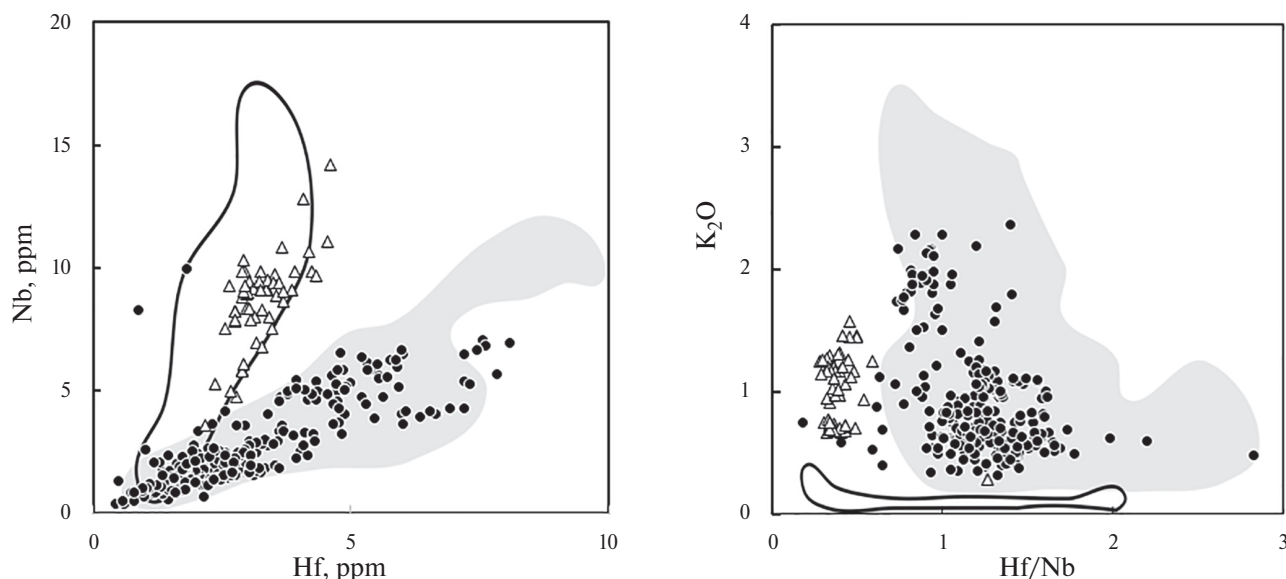


Рис. 7. Бинарные диаграммы Hf–Nb и Hf/Nb–K₂O для основных и средних расплавов молодых вулканов ВВП и СХ.

Маркеры расплавов ВВП и СХ те же, что и ранее. Полями отмечены расплавы офиолитов Камчатского мыса (пустое поле) и вулканов Южной Камчатки (серое поле) (см. [Наумов и др., 2020] и ссылки в этой работе).

Относительно четкие различия в расположении фигуративных точек основных расплавов ВВП и СХ присутствуют лишь на диаграммах, учитывающих содержания ниобия. В частности, на вариационной диаграмме Y–Nb, коррелирующей соотношения этих компонентов с особенностями мантийного источника и степени его плавления [Portnyagin, 2007], маркеры расплавов разных обстановок попадают в поля, различающиеся по степени обогащенности источника: если расплавы ВВП близки к N-MORB, то расплавы СХ тяготеют к примитивной или метасоматизированной мантии (рис. 6).

Существует и более наглядный параметр, демонстрирующий различия основных/средних расплавов разных геодинамических обстановок. Таким параметром может служить отношение высоkozарядных элементов Hf и Nb. Для абсолютного большинства расплавов Восточного вулканического пояса характерно отношение Hf: Nb 0.9–1.4 (рис. 7), в то время как для расплавов Срединного хребта оно существенно ниже – 0.3–0.4. Единичные расплавные включения с подобными параметрами встречаются и на вулканах ВВП (Авачинский, Карымский), что, вероятно, может фиксировать процессы магматического смешения.

Таким образом, можно констатировать наличие специфического источника магмогенерации,

поставляющего расплав или флюид, обогащенный Nb относительно Hf. Причем присутствие этого источника характеризует, главным образом, четвертичный вулканизм Срединного хребта. Механизм формирования таких относительно обогащенных ниобием расплавов пока окончательно неясен. Среди всего массива данных по составам расплавных включений вулканитов Камчатки, включая Южную Камчатку и разновременные вулканиты приключенных палеодуг (см. [Наумов, 2020] и ссылки в этой работе), помимо расплавов СХ обнаружен единственный объект со сходными значениями Nb и Hf – это офиолиты полуострова Камчатский мыс [Portnyagin et al., 2005, 2008]. Впрочем, сходство отношений высоkozарядных элементов (HFSE) в расплавах СХ и офиолитов мелового возраста не дает возможностей для каких-либо генетических обобщений, поскольку другие характеристики этих расплавов совершенно различны (см. рис. 7).

Механизм формирования таких относительно обогащенных ниобием расплавов, как расплавы СХ, пока не ясен. Среди всего массива данных по составам расплавных включений вулканитов Камчатки, включая Южную Камчатку и разновременные вулканиты приключенных палеодуг (см. [Наумов, 2020] и ссылки в этой работе),

обнаружен единственный объект со сходными значениями Nb и Hf — это офиолиты полуострова Камчатский мыс [Portnyagin et al., 2005, 2008]. Впрочем, сходство отношений высоkozарядных элементов (HFSE) в расплавах СХ и офиолитов мелового возраста не дает возможностей для каких-либо генетических обобщений, поскольку другие характеристики этих расплавов совершенно различны (см. рис. 7).

К сожалению, нехватка данных по содержанию многих редких элементов в анализах из разных работ не дает возможности оценить участие многих факторов, определяющих процессы магмогенерации, например, коровой ассимиляции или степени плавления субстрата. А отсутствие данных по изотопным характеристикам расплавов Камчатки, которые могут отличаться от показателей пород (например, [Saal et al., 1998; Bouvier et al., 2022]), делает большинство генетических гипотез в значительной мере спекулятивными, лишенными достаточной доказательной базы. Поэтому представляется весьма оправданным то, что в задачи данной работы входили не столько реконструкция условий магмогенерации, сколько фиксация характеристик расплавов и поиск релевантных критериев для определения принадлежности расплавов тому или иному вулканическому поясу Камчатки.

ВЫВОДЫ

Имеющиеся массивы данных по составам вулканитов Камчатки [GEOROCKS, <https://georoc.eu/georoc/new-start.asp>], остаточных стекол тефры [TephraKam, Portnyagin, 2020] и стекол расплавных включений в минералах [Наумов, 2010], несмотря на частичное совпадение объектов, не дублируют друг друга, но могут являться взаимодополняющими корпусами данных, весьма востребованными для решения петрологических задач.

Несмотря на меньший охват объектов и меньшее количество анализов, в базе данных по составам расплавов Камчатки наиболее равномерно представлены расплавы разной кремнекислотности от пикробазальтов до риодацитов.

В целом расплавы Камчатки имеют вполне традиционный состав для субдукционных

обстановок (будь то островные дуги или активные континентальные окраины), а также задуговых бассейнов.

Расплавы ВВП и СХ характеризуются рядом различий, которые предполагают участие в магмогенерации четвертичных вулканов СХ специфического источника, обогащенного Nb и, в незначительной степени, Th, U, легкими РЗЭ.

Наиболее удобными для выявления геодинамической принадлежности расплавов могут служить отношения микроэлементов, такие как Nb/Y, La/Y, Th/Y, а также Ba/Nb и Nb/Yb. Различия в величинах этих параметрах накапливаются по мере роста кремнекислотности расплавов.

Наиболее эффективным показателем принадлежности основных и средних расплавов ВВП или СХ может служить отношение Hf/Nb.

Специфика расплавов СХ и их относительная обогащенность некогерентными элементами объясняется, вероятно, множественностью петрогенетических факторов, среди которых неоднородность литосферной мантии, разные варианты генезиса флюида, а также возможное участие в магмогенерации астеносферной мантии и коры.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность М.М. Певзнер и А.Д. Бабанскому за помощь в работе.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет средств бюджетного финансирования Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авдейко Г.П., Палуева А.А., Хлебородова О.А. Геодинамические условия вулканизма и магнообразования Курило-Камчатской островодужной системы // Петрология. 2006. Т. 14. № 3. С. 248–265.
<https://doi.org/10.1134/S0869591106030027>

- Балеста С.Т., Zubin M.I., Аносов Г.И., Утнасин В.К. Строение земной коры Камчатки по данным ГСЗ и гравиметрии // Вулканизм островных дуг. М.: Наука, 1977. С. 35–42.
- Волынец А.О., Певзнер М.М., Толстых М.Л., Бабанский А.Д. Вулканизм южной части Срединного хребта Камчатки в неоген-четвертичное время // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 12. С. 1979–1996. <https://doi.org/10.15372/GiG20181204>
- Давыдова М.Ю., Мартынов Ю.А., Перепелов А.Б. Эволюция изотопно-геохимического состава пород вулкана Уксичан (Срединный хребет, Камчатка) и ее связь с неогеновой тектонической перестройкой Камчатки // Петрология. 2019. Т. 27. № 3. С. 282–307. <https://doi.org/10.31857/S0869-5903273283-308>
- Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Литасов Ю.Д. Пути миграции магм и флюидов и составы вулканических пород Камчатки // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 12. С. 1633–1661.
- Колосков А.В., Флеров Г.Б., Перепелов А.Б., Мелекесцев И.В., Пузанков М.Ю., Философова Т.М. Этапы эволюции и петрология Кекукнайского вулканического массива как отражение магматизма тыловой зоны Курило-Камчатской островодужной системы. Часть 2. Петролого-минералогические особенности, модель петрогенезиса // Вулканология и сейсмология. 2013. № 2. С. 63–89. <https://doi.org/10.1134/S0742046313020048>
- Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л., Бушенкова Н.А., Яковлев А.В. Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 6. С. 830–851.
- Наумов В.Б., Коваленко В.И., Бабанский А.Д., Толстых М.Л. Генезис андезитов по данным изучения расплавных включений в минералах // Петрология. 1997. Т. 5. № 6. С. 654–665.
- Наумов В.Б., Коваленко В.И., Дорофеева В.А., Гирнис А.В., Ярмолюк В.В. Средний состав магматических расплавов главных геодинамических обстановок по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стекол пород // Геохимия. 2010. № 12. С. 1266–1288.
- Наумов В.Б., Дорофеева В.А., Гирнис А.В. Среднее содержание летучих компонентов, петрогенных и редких элементов в магматических расплавах главных геодинамических обстановок Земли. I. Расплавы основного состава // Геохимия. 2017. № 7. С. 618–643. <https://doi.org/10.31857/S0016-7525644395-408>
- Наумов В.Б., Дорофеева В.А., Гирнис А.В. Среднее содержание летучих компонентов, петрогенных и редких элементов в магматических расплавах главных геодинамических обстановок Земли. II. Расплавы кислого состава // Геохимия. 2019. Т. 64. № 4. С. 395–408. <https://doi.org/10.31857/S0016752520030097>
- Наумов В.Б., Дорофеева В.А., Толстых М.Л., Гирнис А.В., Ярмолюк В.В. Состав и геохимическая специфика магматических расплавов Камчатки по данным анализа расплавных включений и закалочных стекол пород // Геохимия. 2020. Т. 65. № 3. С. 237–257. <https://doi.org/10.31857/S0016752520030097>
- Наумов В.Б., Дорофеева В.А., Гирнис А.В. Петрогенные, летучие, рудные и редкие элементы в магматических расплавах главных геодинамических обстановок земли. I. Средние содержания // Геохимия. 2023. Т. 68. № 12. С. 1253–1272.
- Перепелов А.Б., Татарников С.А., Павлова Л.А. и др. НЕВ-адакитовый вулканизм Центральной Камчатской Депрессии // Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии: Вулканизм и геодинамика. Петропавловск-Камчатский, 2009. Т. 2. С. 449–454.
- Сухов А.Н., Цуканов Н.В., Беляцкий Б.В. и др. Вулканические комплексы тыловой части позднемеловой Ачайваям-Валагинской палеодуги в структуре хребта Кумроч (Восточная Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 4. Вып. 32. С. 20–34.
- Толстых М.Л., Наумов В.Б., Певзнер М.М., Бабанский А.Д., Кононкова Н.Н. Геохимические особенности магм крупнейшего голоценового извержения вулкана Хангар (Срединный хребет Камчатки) по данным изучения расплавных включений // Геохимия. 2021. Т. 66. № 2. С. 127–144. <https://doi.org/10.31857/S0016752521020084>
- Цуканов Н.В. Тектоно-стратиграфические террейны Камчатской активной окраины: строение, состав и геодинамика // Вулканизм и связанные с ним процессы: материалы XXV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2015. С. 97–103. <https://doi.org/10.31857/S2686739720060213>
- Шапиро М.Н., Ландер А.В. Формирование современной зоны субдукции на Камчатке // Очерки геофизических исследований “К 75-летию Объединенного Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта”. М.: ОИФЗ РАН, 2003. С. 338–344.
- Шапиро М.Н., Соловьев А.В. Кинематическая модель формирования Олюторско-Камчатской складчатой области // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 8. С. 863–880.
- Avdeiko G.P., Savelyev D.P., Palueva A.A., Popruzhenko S.V. Evolution of the Kurile-Kamchatkan Volcanic Arcs and Dynamics of the Kamchatka-Aleutian Junction // Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region. Geophysical Monograph Series. 2007. V. 172. <https://doi.org/10.1029/172GM04>

- Baier J., Audétat A., Keppler H. The origin of the negative niobium tantalum anomaly in subduction zone magmas // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2008. V. 267. № 1–2. С. 290–300. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.11.032>
- Borisova A.Y. Silica-rich melts originating from melt-hydrated peridotite reactions // *Lithos.* 2022. V. 434. P. 106926. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106926>
- Bouvier A.S., Rose-Koga E.F., Nichols A.R.L., Le Lay C. Melt inclusion formation during olivine recrystallization: evidence from stable isotopes // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2022. V. 592. Art. № 117638.
- Brophy J.G. A study of rare earth element (REE) – SiO₂ variations in felsic liquids generated by basalt fractionation and amphibolite melting: a potential test for discriminating between the two different // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2008. V. 156. P. 337–357.
- Churikova T., Dorendorf, F., Wörner G. Sources and Fluids in the Mantle Wedge below Kamchatka, Evidence from Across-arc Geochemical Variation // *Journal of Petrology.* 2001. V. 42. № 8. P. 1567–1593. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.8.1567>
- Churikova T., Wörner G., Mironov N., Kronz A. Volatile (S, Cl and F) and fluid mobile trace element compositions in melt inclusions: Implications for variable fluid sources across the Kamchatka arc // *Contributions to Mineralogy and Petrology.* 2007. V. 154. P. 217–239. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0190-z>
- Danyushevsky L.V., Eggins S.M., Falloon T.J., Christie D.M. H₂O abundance in depleted to moderately enriched mid-ocean ridge magmas. Part I: Incompatible behaviour, implications for mantle storage, and origin of regional variations // *Journal of Petrology.* 2000. V. 41. № 8. P. 1329–1364. <https://doi.org/10.1093/petrology/41.8.1329>
- Danyushevsky L., Plechov P. Petrolog3: Integrated software for modeling crystallization processes // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems.* 2011. V. 12. № 7. <https://doi.org/10.1029/2011GC003516>
- Duggen S., Portnyagin M., Baker J., Ulfbeck D., Hoernle K., Garbe-Schönberg D., Grassineau N. Drastic shift in lava geochemistry in the volcanic-front to rear-arc region of the Southern Kamchatkan subduction zone: Evidence for the transition from slab surface dehydration to sediment melting // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2007. V. 71. № 2. P. 452–480. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.09.018>
- Ford C.E., Russell D.G., Craven J.A., Fisk M.R. Olivine-liquid equilibria: temperature, pressure and composition dependence of the crystal/liquid cation partition coefficients for Mg, Fe²⁺, Ca and Mn // *Journal of Petrology.* 1983. V. 24. № 3. P. 256–266. <https://doi.org/10.1093/petrology/24.3.256>
- Gavrilenko M., Herzberg C., Vidito C., Carr M.J., Tenner T., Ozerov A. A Calcium-in-Olivine Geohygrometer and its Application to Subduction Zone Magmatism // *Journal of Petrology.* 2016. V. 57. P. 1811–1832. <https://doi.org/10.1093/petrology/egw062>
- Gorbatov A., Fukao Y., Widiyantoro S., Gordeev E. Seismic evidence for a mantle plume oceanwards of the Kamchatka-Aleutian trench junction // *Geophysical Journal International.* 2001. V. 146. № 2. P. 282–288. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01439.x>
- Jochum K.P., Dingwell D.B., Rocholl A., Stoll B., Hofmann A.W., Becker S., Zimmer M. The preparation and preliminary characterisation of eight geological MPI-DING reference glasses for in-situ microanalysis // *Geostandards Newsletter.* 2000. V. 24. № 1. P. 87–133. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2000.tb00590.x>
- Jochum K.P., Stoll B., Herwig K., Willbold M., Hofmann A.W., Amini M., Woodhead J.D., MPI-DING glasses: New geological reference materials for in situ Pb isotope analysis. MPI-DING reference glasses for in situ microanalysis: New reference values for element concentrations and isotope ratios // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems.* 2006. V. 7. № 2. <https://doi.org/10.1029/2005GC001060>
- Halsor S.P. Large glass inclusions in plagioclase phenocrysts and their bearing on the origin of mixed andesitic lavas at Toliman Volcano, Guatemala // *Bulletin of Volcanology.* 1989. V. 51. P. 271–280. <https://doi.org/10.1007/BF01073516>
- Hodge K.F., Jellinek A.M. The influence of magma mixing on the composition of andesite magmas and silicic eruption style // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. № 13. P. e2020GL087439. <https://doi.org/10.1038/ncomms6607>
- Humphreys M.C.S., Blundy J.D., Sparks R.S.J. Magma Evolution and Open-System Processes at Shiveluch Volcano: Insights from Phenocryst Zoning // *J. Petrol.* 2006. V. 47. P. 2303–2334. <https://doi.org/10.1093/petrology/egl045>
- Humphreys M.C.S., Blundy J.D., Sparks R.S.J. Shallow-level decompression crystallisation and deep magma supply at Shiveluch Volcano // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2008. V. 155. P. 45–61. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-223-7>
- Kamenetsky V.S., Everard J.L., Crawford A.J., Varne R., Eggins S.M., Lanyon R. Enriched end-member of primitive MORB melts: petrology and geochemistry of glasses from Macquarie Island (SW Pacific) // *Journal of Petrology.* 2000. V. 41. № 3. P. 411–430. <https://doi.org/10.1093/petrology/41.3.411>
- Kepezhinskas P., Mcdermott F., Defant M.J., Hochstaedter A., Drummond M.S., Hawkesworth C.J., Koloskov A.V., Maury R.C., Bellon H. Trace element and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on a three-component model of Kamchatka Arc petrogenesis // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1997. V. 61. № 3. P. 577–600. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(96\)00349-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(96)00349-3)
- Klein M., Stosch H.G., Seck H.A. Partitioning of high field-strength and rare-earth elements between amphibole and

- quartz-dioritic to tonalitic melts: an experimental study // *Chemical Geology*. 1997. V. 138. № 3–4. С. 257–271.
- Lowe D.J., Pearce N.J., Jorgensen M.A., Kuehn S.C., Tryon C.A., Hayward C.L.* Correlating tephra and cryptotephra using glass compositional analyses and numerical and statistical methods: review and evaluation // *Quaternary Science Reviews*. 2017. V. 175. P. 1–44.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.08.003>
- Moore G., Carmichael I.S.E.* The hydrous phase equilibria (to 3 kbar) of an andesite and basaltic andesite from western Mexico: constraints on water content and conditions of phenocryst growth // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1998. V. 130. № 3. P. 304–319.
<https://doi.org/10.1007/s004100050367>
- Nekrylov N.A., Popov D.V., Plechov P.Y., Shcherbakov V.D., Danyushevsky L.V.* The origin of the Late Quaternary back-arc volcanic rocks from Kamchatka: evidence from the compositions of olivine and olivine-hosted melt inclusions // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2021. V. 176. № 9. P. 71.
<https://doi.org/10.1007/s00410-021-01830-4>
- Nekrylov N.A., Popov D.V., Plechov P.Y., Shcherbakov V.D., Danyushevsky L.V., Dirksen O.V.* Garnet-pyroxenite-derived end-member magma type in Kamchatka: evidence from composition of olivine and olivine-hosted melt inclusions in Holocene rocks of Kekuknaisky volcano // *Petrology*. 2018. V. 26. P. 329–350.
<https://doi.org/10.1134/S0869591118040057>
- Nielsen C.H., Sigurdsson H.* Quantitative methods for electron microprobe analysis of sodium in natural and synthetic glasses // *American Mineralogist*. 1981. V. 66. № 5–6. P. 547–552.
- Pal T., Mitra S.K., Sengupta S., Katari A., Bandopadhyay P.C., Bhattacharya A.K.* Dacite-andesites of Narcondam volcano in the Andaman Sea – an imprint of magma mixing in the inner arc of the Andaman-Java subduction system // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2007. V. 168. № 1–4. P. 93–113.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.08.005>
- Park J., Levin V., Brandon M. et al.* A dangling slab, amplified arc volcanism, mantle flow and seismic anisotropy in the Kamchatka plate corner, in *Plate Boundary Zones*. Washington, D.C.: American Geophysical Union, *Geodynamics Series*, 2002. V. 30. P. 295–324.
- Pearce J.A., Baker P.E., Harvey P.K., Luff I.W.* Geochemical evidence for subduction fluxes, mantle melting and fractional crystallization beneath the South Sandwich Island Arc // *Journal of Petrology*. 1995. V. 36. P. 1073–1109. <https://doi.org/10.1093/petrology/36.4.1073>
- Pearce J.A., Stern R.J.* Origin of back-arc basin magmas: Trace element and isotope perspectives // *Back-arc spreading systems: Geological, biological, chemical, and physical interactions*. 2006. V. 166. P. 63–86.
<https://doi.org/10.1029/166GM06>
- Plank T.* Constraints from thorium/lanthanum on sediment recycling at subduction zones and the evolution of the continents // *Journal of Petrology*. 2005. V. 46. № 5. P. 921–944. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi005>
- 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 // *Geophysical Monograph Series*. 2007. P. 41.
- Portnyagin M., Hoernle K., Plechov P., Mironov N., Khubunaya S.* 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 and Planet. Sci. Lett.* 2007. V. 255. № 1–2. P. 53–69.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.12.005>
- Portnyagin M., Saveliev D., Hoernle K., Hauff F., Gabre-Schönberg D.* Mid-Cretaceous Hawaiian tholeiites preserved in Kamchatka // *Geology*. 2008. V. 36. № 11. P. 903–906. <https://doi.org/10.1130/G25171A.1>
- Portnyagin M., Mironov N., Botcharnikov R., Gurenko A., Almeev R.R., Luft C., Holtz F.* Dehydration of melt inclusions in olivine and implications for the origin of silica-undersaturated island-arc melts // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2019. V. 517. P. 95–105.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.04.021>
- Portnyagin M.V., Ponomareva V.V., Zelenin E.A., Bazanova L.I., Pevzner M.M., Plechova A.A., Garbe-Schönberg D.* TephraKam: geochemical database of glass compositions in tephra and welded tuffs from the Kamchatka volcanic arc (northwestern Pacific) // *Earth System Science Data*. 2020. V. 12. № 1. P. 469–486.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23627.13606>
- Saal A.E., Hart S.R., Shimizu N., Hauri E.H., Layne G.D.* Pb isotopic variability in melt inclusions from oceanic island basalts, Polynesia // *Science*. 1998. V. 282. P. 1481–1484.
- Schiano P., Clocchiatti R., Shimizu N., Maury R.Cc., Jochum K.P., Hofmann A.W.* Hydrous, silica-rich melts in the sub-arc mantle and their relationship with erupted arc lavas // *Nature*. 1995. V. 377. № 6550. P. 595–600.
- Sobolev A.V., Chaussidon M.* H₂O concentrations in primary melts from supra-subduction zones and mid-ocean ridges: implications for H₂O storage and recycling in the mantle // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1996. V. 137. № 1–4. P. 45–55.
[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(95\)00203-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(95)00203-0)
- Straub S., Gomez-Tuena A., Stuart F., Zellmer G., Espinasa-Perena R., Cai Y., Iizuka Y.* Formation of hybrid arc andesites beneath thick continental crust // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2011. V. 303. P. 337–347.
<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.12.005>

- Sisson T.W.* Pyroxene-high silica rhyolite trace element partition coefficients measured by ion microprobe // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1991. V. 55. № 6. P. 1575–1585. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90129-S](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90129-S)
- Sisson T.W.* Hornblende-melt trace-element partitioning measured by ion microprobe // *Chemical Geology*. 1994. V. 117. № 1–4. P. 331–344. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90135-X](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90135-X)
- Sun S.-S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geological Society. London. Special Publications. 1989. V. 42. P. 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Volynets A.O., Churikova T.G., Wörner G., Gordeychik B.N., Layer P.* Mafic Late Miocene–Quaternary volcanic rocks in the Kamchatka back arc region: implications for subduction geometry and slab history at the Pacific–Aleutian junction // *Contributions to mineralogy and petrology*. 2010. V. 159. P. 659–687. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.12.004>
- Volynets A., Nekrylov N., Gorbach N., Ovsyannikov G., Tolstykh M., Pevzner M., Scherbakov V. et al.* Geochemical diversity and tectonic relationships in monogenetic volcanic fields: A case study of the Sredinny Range, Kamchatka // *Lithos*. 2023. V. 456. P. 107306. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107306>
- Yogodzinski G.M., Lees J.M., Churikova T.G., Dorendorf F., Wöerner G., Volynets O.N.* Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges // *Nature*. 2001. V. 409. № 6819. P. 500–504. <https://doi.org/10.1038/35054039>
- Zhao L., Liu X., Zhao D., Wang X., Qiao Q.* Mapping the Pacific slab edge and toroidal mantle flow beneath Kamchatka // *Journal of Geophys. Res.: Solid Earth*. 2021. V. 126. № 11. <https://doi.org/10.1029/2021JB022518>

Geochemical Characteristics of Melts from the Eastern Volcanic Belt and Sredinny Range of Kamchatka: Analysis of Evidence from Melt Inclusions

M. L. Tolstykh^{1, *}, V. B. Naumov^{1, **}, A. V. Girnits^{2, ***}

¹*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS,
Kosygina str., 19, Moscow, 119334 Russia*

²*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS,
Staromonetny lane, 35, Moscow, 119017 Russia*

*e-mail: mashtol@mail.ru

**e-mail: naumov@geokhi.ru

***e-mail: girnits@igem.ru

We analyzed sets of published data on the composition of glasses from melt inclusions in minerals of volcanics from the Eastern Volcanic Front and Sredinny Range of Kamchatka. A significant difference was revealed between the distribution of silica contents in the rocks and melts: intermediate compositions are most common among the rocks, whereas the melts are dominantly silicic. The distribution of major and trace element was analyzed. It was shown that the contents of some elements are environment-specific (e. g., Nb and light REE). We distinguished trace element ratios in melts that most strongly correlate with the geodynamic setting.

Keywords: melt inclusions, Kamchatka, Sredinny Range, Eastern Volcanic Belt