

ПЕТРОГЕНЕЗИС МЕЙМЕЧИТОВ СИХОТЭ-АЛИНЯ (ДАННЫЕ ПО РАСПЛАВНЫМ ВКЛЮЧЕНИЯМ)

В.А. Симонов^{1,3}, В.С. Приходько², С.В. Ковязин¹, А.В. Котляров¹

¹ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, пр-т Академика Коптюга 3, г. Новосибирск, 630090; e-mail: simonov@igm.nsc.ru

²ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, ул. Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 68000; e-mail: vladimir@itig.as.khb.ru

³Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова 2, г. Новосибирск, 630090

Поступила в редакцию 19 ноября 2013 г.

В результате исследования состава минералов и расплавных включений в них получена новая информация о физико-химических условиях петрогенезиса меймечитов Сихотэ-Алиня. Данные по составам минералов субвулканических ультраосновных пород из двух местонахождений (бассейны рек Барахта и Катэн) свидетельствуют о сходстве рассматриваемых меймечитов с эталонными породами Маймеча-Котуйской провинции и об их формировании во внутриплитных условиях. Эксперименты с расплавными включениями в оливинах и расчетное моделирование на основе данных о составе стекол включений показали незначительные различия температурных режимов магматических систем, формировавших меймечиты из местонахождений по р. Барахта (1235–1280 °С) и р. Катэн (1230–1300 °С). Результаты исследования включений в оливинах показали, что кристаллизация меймечитов Сихотэ-Алиня происходила из базальтоидных расплавов (соответствующих по химическому составу оливиновым базальтам и микробазальтам) в результате кумуляции оливинов. Данные по особенностям распределения титана, редких и редкоземельных элементов в расплавных включениях свидетельствуют об активном участии плюмовых магматических систем при формировании меймечитовых комплексов Сихотэ-Алиня. Прямой анализ с помощью ионного зонда содержания летучих компонентов в стеклах прогретых расплавных включений в оливинах выявил существенные различия в содержании воды в магматических системах, формировавших меймечиты бассейнов р. Барахта (0.82–0.9 мас. % и до 2.45 мас. %) и р. Катэн (0.22–0.30 мас. %).

Ключевые слова: расплавные включения, петрогенезис, меймечиты, Сихотэ-Алинь.

ВВЕДЕНИЕ

Вулканические породы ультраосновного состава привлекают к себе пристальное внимание в связи с тем, что они содержат прямую информацию об исходных, наиболее глубоких, магматических системах. В этом отношении большое значение имеют исследования условий формирования меймечитов с помощью анализа расплавных включений в минералах-вкрапленниках. В последнее время данные по включениям активно и успешно используются при изучении меймечитов Сибирской платформы [4–7, 16, 30]. Подобный подход был применен нами для выяснения физико-химических параметров кристаллизации пород меймечитовых комплексов Сихотэ-Алиня.

Во время экспедиционных работ в Центральном Сихотэ-Алине (бассейн р. Барахта, притока р. Анюй)

авторами была собрана представительная коллекция образцов меймечитов, составившая основу для изучения условий их петрогенезиса с помощью анализа составов минералов и находящихся в них расплавных включений. При подготовке статьи были использованы также полученные нами ранее данные по меймечитам из района р. Катэн, Сихотэ-Алинь [11] и материалы В.С. Приходько.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования расплавных включений выполнены в лаборатории геодинамики и магматизма Института геологии и минералогии СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Включения исследовались в высокотемпературной микротермокамере с инертной средой [14] с точностью замеров ± 5 °С. Использование в качестве инертной среды

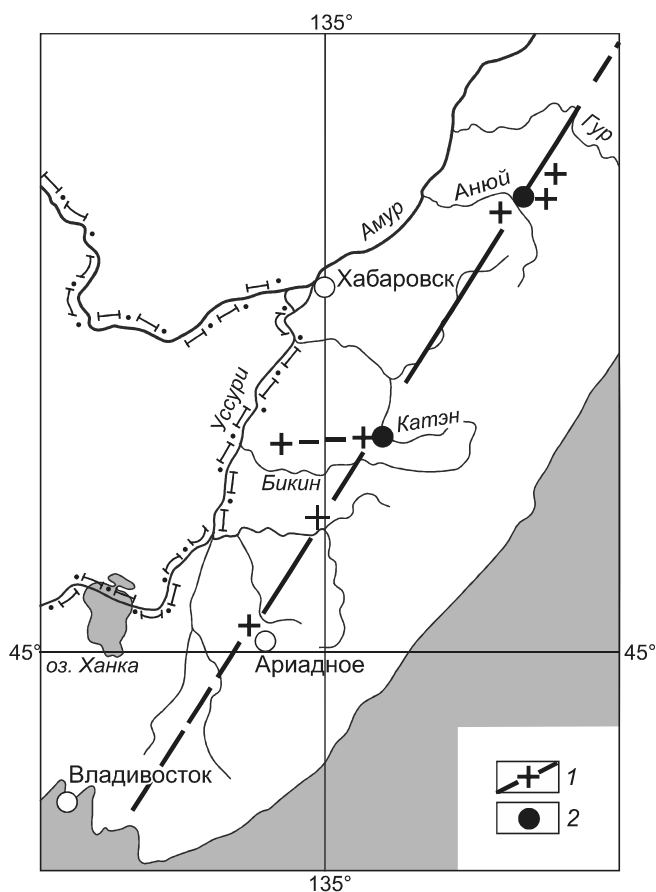


Рис. 1. Районы развития меймечитовых комплексов Сихотэ-Алиня.

1 – выходы меймечитов и меймечитовая линия (по Щеке С.А.),
2 – местонахождение изученных образцов меймечитов.

особо чистого аргона показало, что при продувке от 5 до 20 минут сохраняется прозрачность изученных оливинов и можно наблюдать за процессами во включениях в течение всего эксперимента вплоть до температур гомогенизации (свыше 1200 °С). Эксперименты с включениями при высоких температурах проводились согласно опубликованным ранее методикам [8, 13, 16, 31] с учетом относительно малой вязкости базальтовых расплавов и сведения к минимуму возможности растворения матрицы минерала-хозяина: время опыта при температуре свыше 1000 °С не превышало 10 минут. При этом свыше 1100 °С эксперимент продолжался 3–5 минут при скорости нагрева вблизи температур гомогенизации около 30 °С/мин. Большое внимание уделялось контролю замеров температур и проводилась постоянная корректировка данных с помощью эталонов (Au).

Составы оливинов, хромшпинелидов, клинопироксенов и стекол гомогенизированных расплавленных

включений изучены на рентгеновском микроанализаторе «Самбах-микро» в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск). Содержания редких и редкоземельных элементов в клинопироксенах и в стеклах прогретых расплавленных включений (а также воды во включениях) определены методом вторично-ионной масс-спектрометрии на ионном микроанализаторе IMS-4f в Институте микроэлектроники РАН (г. Ярославль) по опубликованной методике [15].

ГЕОЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕЙМЕЧИТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ СИХОТЭ-АЛИНЯ

Нами были изучены меймечиты из двух местонахождений в пределах Самаркинской аккреционной призмы (рис. 1). В среднем течении р. Анюй (Бархатинский участок) в составе терригенно-вулканогенно-кремнистой ассоциации развиты ультраосновные вулканические породы. Согласно данным И.П. Бойко, М.В. Мартынюка и Б.Г. Матвеева, здесь закартирована вулканическая постройка, состоящая из пластовых тел диабазов, миндалекаменных базальтов и гиалокластитов. Дайки и силлы меймечитов широко развиты вблизи предполагаемого центра вулканического извержения. В строении Катэнского участка принимают участие кремнистые, алевролитовые, микститовые и песчанниковые образования. Вулканические породы ассоциируют преимущественно с кремнистыми отложениями и представлены потоками спилитов и гиалокластитов. Штоки и дайки меймечитов развиты вблизи Катэнского ультрабазитового массива. В рассматриваемых местонахождениях меймечиты ассоциируют с калиевыми внутриплитными океаническими базальтоидами [32].

По петрографическим характеристикам ультраосновные вулканические породы из этих местонахождений сходны. Это – темно-зеленые крупнопорфировые миндалекаменные породы комковатого облика. К парагенезису минералов-вкрапленников, составляющих 40–80 % объема пород, относятся оливин и хромшпинелид, реже клинопироксен. Оливины иногда нацело замещены серпентином и рудным минералом. Хромшпинелиды встречаются в виде мелких идиоморфных кристаллов, размером от 0.1 до 1.0 мм, часто окруженных магнетитовой каймой, или в виде минеральных включений в зернах оливина. Основная масса меймечитов сложена серпентинизированным стеклом, рудным веществом (ильменитом, магнетитом), микролитами клинопироксена.

Согласно предыдущим исследованиям [1, 3, 18, 19, 32 и др.] и нашим новым данным по химическому составу меймечиты Сихотэ-Алиня имеют сходство с эталонными меймечитами Сибирской платформы (табл. 1). В частности, на диаграммах для расплавленных

Таблица 1. Представительные анализы меймечитов Сихотэ-Алиня (мас. %).

№ п/п	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	П.п.п.	Сумма
1	41260	36.71	0.78	4.33	10.90	0.16	26.27	4.16	0.25	0.31	0.09	14.70	98.41
2	41261	36.50	0.78	4.22	10.79	0.17	26.66	4.87	0.25	0.25	0.10	14.09	98.42
3	41266	40.44	0.79	4.00	11.14	0.20	31.86	4.26	0.25	0.23	0.10	5.03	98.30
4	41264	39.66	1.08	4.59	12.39	0.19	26.26	4.16	0.25	0.23	0.14	9.59	98.28
5	41265	39.98	1.04	4.55	12.27	0.19	25.74	4.14	0.25	0.18	0.13	10.10	98.32

Примечание. Составы меймечитов из Барахтинского (1–3) и Катэнского (4, 5) участков. Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, лаборатория рентгеноспектрального анализа. Метод анализа – рентгенофлуоресцентный, методики КХА 165/2009, НСАМ № 118-Х. Средства измерения: спектрометр СРМ-25 (зав. № 72), весы AUX 120 (зав. № D449400404).

ных включений (CaO–MgO, Al₂O₃–MgO, CaO–Al₂O₃–MgO) точки составов исследованных пород практически располагаются в полях сибирских меймечитов.

ОЛИВИНЫ, ХРОМШПИНЕЛИДЫ И КЛИНОПИРОКСЕНЫ

В ходе обработки коллекций исследовались составы оливинов, содержащих расплавленные включения, из меймечитов Барахтинского и Катэнского участков. Для хромшпинелидов наиболее информативными оказались исследования образцов из Катэнского участка, а для клинопироксенов представительные данные были получены в случае меймечитов Барахтинского местонахождения. Составы проанализированных минералов приведены в таблицах 2 и 3.

Оливины в изученных образцах меймечитов Сихотэ-Алиня наблюдаются преимущественно в виде относительно крупных (до 0.5–1 см) округло-ограниченных кристаллов-вкрапленников, занимающих основной объем породы (рис. 2). Особенности состава изученных оливинов является их относительно высокая и переменная магнезиальность (Fo = 90–83) с максимальными значениями форстеритового компонента в минералах из пород Барахтинского участка (90.45). Среднее содержание хрома в оливинах этих меймечитов выше, чем в оливинах из пород Катэнского участка, а марганца – ниже, что хорошо согласуется с их магнезиальностью. По этим характеристикам рассмотренные минералы близки оливинам из меймечитов Сибирской платформы и из внутриплитных базальтов, формировавшихся на мощной (более 70 км) литосфере. При этом, к полю сибирских меймечитов приурочены в основном оливины из пород бассейна р. Барахта, а к внутриплитным базальтам – минералы Катэнского района (рис. 3).

Хромшпинелиды из меймечитов часто встречаются в виде микрокристалликов и тесно ассоциируют с расплавленными включениями в оливинах. По соотношению Al–Cr–Fe³⁺ они отвечают субферриалюмохромитам и ферриалюмохромитам, полностью соответствуя хромитам из меймечитов Антарктики [27]. На

диаграммах Cr#–Mg# и Cr₂O₃–FeO рассмотренные хромшпинелиды разделяются на две группы, главным образом по значениям магнезиальности и содержанию железа (24–25 и 28–32 мас.%). Менее магнезиальные (Mg# минимум 47 %) составы совпадают с данными по хромитам из меймечитов Антарктики (на продолжении Трапповой провинции Карру). По высоким содержаниям титана (до 2.6 мас. %) шпинели из меймечитов района р. Катэн схожи с минералами из плюмовых базальтов типа OIB и из меймечитов Антарктики, существенно отличаясь от хромитов из базит-гипербазитовых комплексов срединно-океанических хребтов, а также из платиноносных массивов Сибирской платформы и Урала. На диаграмме TiO₂–Al₂O₃ фигуративные точки хромитов из меймечитов Сихотэ-Алиня и Антарктики практически перекрываются, тесно ассоциируют с данными по шпинелям из базальтов типа OIB и из континентальных платобазальтов, располагаясь между полями этих групп минералов (рис. 4).

Клинопироксены в рассмотренных меймечитах в виде относительно мелких (преимущественно до 1–4 мм) зерен занимают пространство между крупными кристаллами оливина (рис. 2). Наиболее представительные данные по составам пироксенов были получены в результате исследования образцов из района р. Барахты. Микронзондовый анализ (табл. 3) показал, что по соотношению MgO, FeO и CaO клинопироксены отвечают главным образом диопсиду в отличие от минералов из меймечитов Сибири и Антарктики, значительная часть которых соответствует авгиту.

По соотношению TiO₂–FeO клинопироксены, показывая обогащенность титаном (от 0.6 до 2.6 мас. %), формируют отчетливый положительный тренд, совпадающий в значительной мере с данными по пироксенам из меймечитов Маймеча-Котуйской провинции (Сибирская платформа). При этом существенная часть фигуративных точек располагается в поле минералов из плюмовых базальтов внутриплитных океанических островов (OIB), к которому приурочены практически все клинопи-

Таблица 2. Представительные анализы оливинов и хромшпинелидов из меймечитов Сихотэ-Алиня (мас. %).

№ п/п	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	NiO	Сумма	Fo	Cr#
1	39.39	0.02	0.00	0.07	13.49	0.21	45.48	0.35	0.01	0.00	н.о.	99.02	85.14	
2	39.59	0.03	0.00	0.06	12.87	0.19	45.55	0.40	0.02	0.00	н.о.	98.72	85.67	
3	38.91	0.04	0.00	0.05	13.84	0.24	45.53	0.38	0.02	0.00	н.о.	99.01	84.78	
4	39.05	0.04	0.00	0.07	14.08	0.22	45.09	0.36	0.04	0.00	н.о.	98.95	84.48	
5	39.77	0.02	0.01	0.09	12.51	0.22	46.27	0.38	0.04	0.00	н.о.	99.29	86.19	
6	40.20	0.02	0.00	0.08	11.74	0.23	46.01	0.34	0.04	0.00	н.о.	98.66	86.86	
7	39.75	0.03	0.00	0.10	14.16	0.21	44.55	0.40	0.01	0.00	н.о.	99.20	84.22	
8	39.26	0.03	0.00	0.08	14.41	0.24	44.43	0.38	0.02	0.00	н.о.	98.84	83.95	
9	40.32	0.03	0.02	0.14	8.91	0.14	48.72	0.31	0.04	0.00	н.о.	98.61	90.20	
10	40.50	0.02	0.01	0.07	8.76	0.18	49.50	0.29	0.02	0.00	н.о.	99.36	90.45	
11	37.17	0.02	0.01	0.04	13.62	0.20	46.67	0.12	0.02	н.о.	0.34	98.21	85.33	
12	38.95	0.03	0.00	0.05	13.58	0.19	46.52	0.13	0.02	н.о.	0.36	99.82	85.30	
13	39.70	0.03	0.00	0.07	13.26	0.20	46.62	0.14	0.02	н.о.	0.35	100.37	85.60	
14	39.83	0.02	0.01	0.05	15.01	0.22	44.75	0.16	0.01	н.о.	0.32	100.38	83.51	
15	39.54	0.02	0.00	0.03	14.79	0.21	44.54	0.16	0.02	н.о.	0.32	99.62	83.65	
16	38.88	0.03	0.01	0.06	15.43	0.23	44.85	0.13	0.02	н.о.	0.34	99.97	83.19	
17	39.09	0.02	0.01	0.04	15.69	0.23	44.53	0.13	0.03	н.о.	0.33	100.09	82.87	
18	38.41	0.02	0.01	0.05	14.04	0.21	46.98	0.14	0.06	н.о.	0.31	100.24	85.03	
19	0.09	2.16	13.63	44.17	24.07	0.20	13.65	0.01	0.03	н.о.	0.23	98.22	62.54	68.49
20	0.04	2.57	11.80	43.85	24.54	0.16	14.64	0.05	0.02	н.о.	0.29	97.97	66.81	71.37
21	0.04	2.58	11.67	43.01	24.76	0.16	14.90	0.05	0.02	н.о.	0.25	97.44	68.10	71.20
22	1.27	2.26	10.41	40.59	27.76	0.14	14.93	0.15	0.05	н.о.	0.31	97.88	66.33	72.34
23	0.01	2.36	12.12	42.43	31.67	0.19	10.07	0.02	0.04	н.о.	0.24	99.15	47.04	70.14
24	0.07	2.31	13.21	43.31	24.66	0.17	13.86	0.00	0.04	н.о.	0.28	97.92	63.53	68.74
25	0.10	2.25	13.14	43.48	24.58	0.15	13.91	0.01	0.04	н.о.	0.24	97.89	63.67	68.94
26	00	2.76	11.72	43.5	28.67	00	10.72	00	00	н.о.	00	97.47	51.08	71.35
27	00	2.36	11.54	45.51	27.92	00	10.51	00	00	00	00	97.84	50.33	72.57
28	00	3.13	11.77	41.07	30.2	00	10.5	00	00	00	00	97.64	50.32	70.10
29	00	2.98	11.6	44.35	27.55	00	10.99	00	00	00	00	97.47	52.11	71.95
30	00	3.33	12.88	41.49	28.76	00	11.2	00	00	00	00	97.87	52.91	67.59

Примечание. 1–18 – оливины из меймечитов бассейна р. Барахты (1–10) и бассейна р. Катэн (11–18); 19–25 – хромшпинелиды из меймечитов Катэнского участка, 26–30 – хромшпинелиды из меймечитов Барахтинского участка.

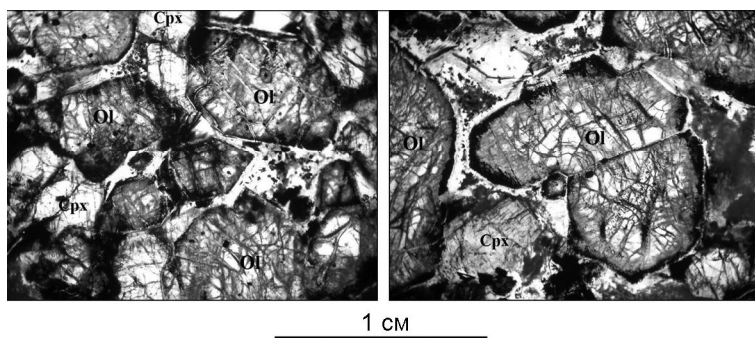


Рис. 2. Структура меймечитов Сихотэ-Алиня.

Ol – оливин. Cpx – клинопироксен. Фото в проходящем свете.

роксены из меймечитов Антарктики (рис. 5). На тройной диаграмме SiO₂/100–TiO₂–Na₂O точки клинопироксенов располагаются в полях минералов из субщелочных и щелочных базальтов внутриплитных океанических островов и перекрываются данными по пироксенам из меймечитов Сибири и Антарктики (рис. 6). Щелочной характер расплавов, из которых кристаллизовались клинопироксены райо-

на р. Барахты, подтверждается и по соотношению Ti–(Ca+Na) в пироксенах. Рассмотренные минералы характеризуются большей магнезиальностью по сравнению с пироксенами из других меймечитов и формируют на диаграмме Al–Mg# отчетливый отрицательный тренд, параллельный трендам данных по эталонным ассоциациям (рис. 7). Обратная картина с положительным трендом видна на диаграмме Ti–Al

Таблица 3. Представительные анализы клинопироксенов из меймечитов Сихотэ-Алиня (мас. %).

№ п/п	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	Mg#
1	81	52.75	0.62	2.26	1.09	3.93	0.09	16.94	22.28	0.29	0.00	100.25	88.48
2	82	48.52	1.60	4.93	0.90	5.48	0.11	14.70	22.28	0.32	0.00	98.84	82.70
3	83	46.77	2.31	6.94	0.60	6.29	0.11	13.82	21.99	0.37	0.00	99.20	79.66
4	84	49.22	1.32	4.21	0.60	5.45	0.14	15.18	22.16	0.36	0.00	98.63	83.23
5	85	49.62	1.89	3.90	0.25	6.28	0.13	15.04	21.85	0.43	0.00	99.39	81.02
6	89	48.14	2.03	6.27	0.83	6.09	0.10	13.88	22.32	0.33	0.00	99.99	80.24
7	90	52.01	0.61	2.09	1.03	4.06	0.10	16.81	22.59	0.30	0.00	99.61	88.06
8	91	50.56	1.01	3.25	0.88	4.96	0.14	16.02	22.23	0.24	0.00	99.28	85.20
9	92	50.69	0.82	3.01	1.29	4.40	0.11	16.21	22.18	0.31	0.00	99.02	86.78
10	101	51.89	0.72	2.64	1.19	4.23	0.12	16.33	22.53	0.28	0.00	99.92	87.31
11	105	49.88	1.16	3.99	1.19	4.85	0.08	15.36	22.48	0.32	0.01	99.32	84.95
12	106	51.59	0.88	2.77	0.47	5.73	0.12	16.00	21.54	0.32	0.00	99.42	83.27
13	107	49.85	1.68	3.44	0.02	6.96	0.19	14.51	21.89	0.41	0.00	98.95	78.79
14	108	51.61	0.70	2.66	1.16	4.31	0.11	16.26	22.20	0.27	0.00	99.28	87.05
15	109	51.21	0.88	3.20	1.23	4.48	0.13	16.07	22.48	0.26	0.00	99.94	86.47
16	112	52.40	0.64	2.31	0.86	4.30	0.13	16.88	22.42	0.28	0.00	100.22	87.49
17	113	51.61	0.80	2.89	1.30	4.48	0.09	16.23	22.27	0.32	0.00	99.99	86.59
18	114	50.73	1.03	3.63	1.23	4.74	0.11	15.66	22.30	0.28	0.00	99.71	85.48
19	115	49.26	1.33	4.53	1.08	5.16	0.16	15.23	22.39	0.37	0.00	99.51	84.02
20	116	52.23	0.66	2.30	1.04	4.02	0.11	16.73	22.43	0.30	0.00	99.82	88.12
21	12	52.89	1.02	2.21	0.36	5.42		16.78	21.19	0.42	0.00	99.86	84.62
22	13	51.27	1.4	3.67	0.71	6.05		14.96	21.54	0.39	0.00	99.59	81.53
23	15	52.81	0.85	2.09	0.35	5.89		16.21	20.98	0.51	0.00	99.19	83.11
24	16	50.39	1.34	3.97	0.81	4.58		15.26	22.07	0.47	0.00	98.4	85.58
25	17	48.47	2.51	4.41	0.66	5.39		14.43	22.17	0.49	0.00	98.52	82.72
26	18	51.22	1.22	3.27	0.74	4.31		15.46	22.28	0.51	0.00	99.02	86.47
27	18	50.26	1.61	4.46	0.78	4.91		15.07	22.13	0.46	0.00	99.22	84.49
28	20	51.88	1.05	3.01	1.32	3.79		16.11	22.23	0.47	0.00	99.38	88.28
29	21	47.28	2.62	5.92	0.82	5.49		14.14	21.87	0.49	0.00	98.63	82.10

Примечание. 1–20 – клинопироксены из меймечитов бассейна р. Барахта, 21–29 – клинопироксены из меймечитов бассейна р. Катэн.

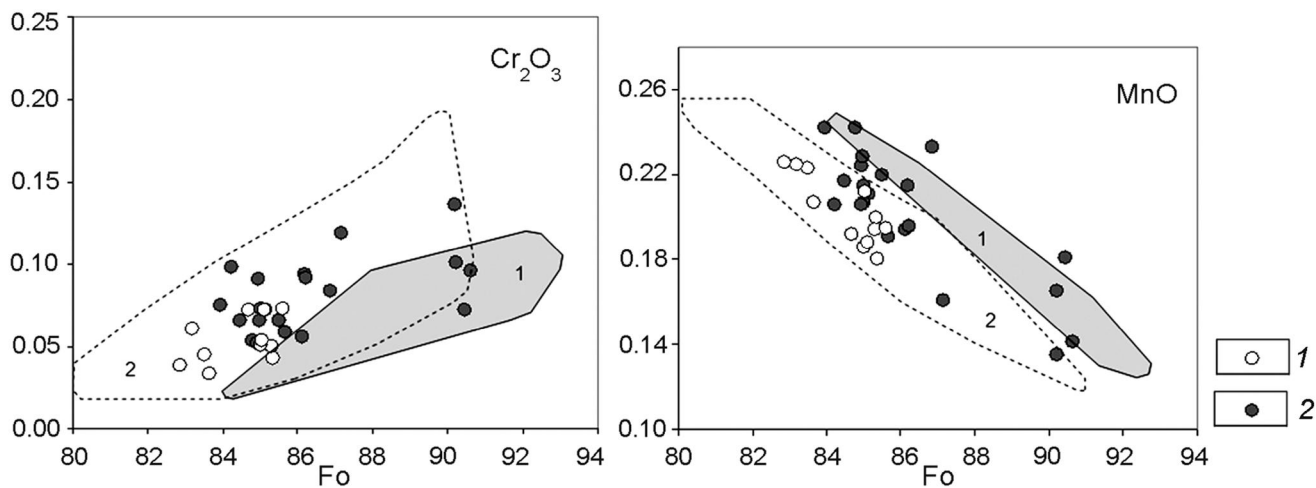


Рис. 3. Составы оливинов (мас. %) из меймечитов Сихотэ-Алиня.

1, 2 – оливины меймечитов из районов рек Барахта (1) и Катэн (2). Поля составов оливинов из меймечитов Сибирской платформы (1) и из внутриплитных базальтов, формировавшихся на мощной (более 70 км) литосфере (2). Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов [16].

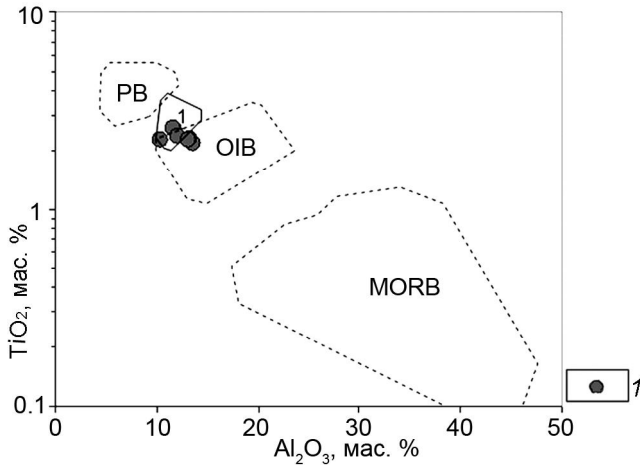


Рис. 4. Диаграмма $TiO_2 - Al_2O_3$ для хромшпинелидов из меймечитов Сихотэ-Алиня.

1 – хромшпинелиды из меймечитов района р. Катэн. Поля составов хромшпинелидов из меймечитов Антарктики (1). Поля составов хромшпинелидов из базальтов: континентальных плато (PB), внутриплитных океанических островов (OIB) и из срединно-океанических хребтов (MORB). Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов [21, 27].

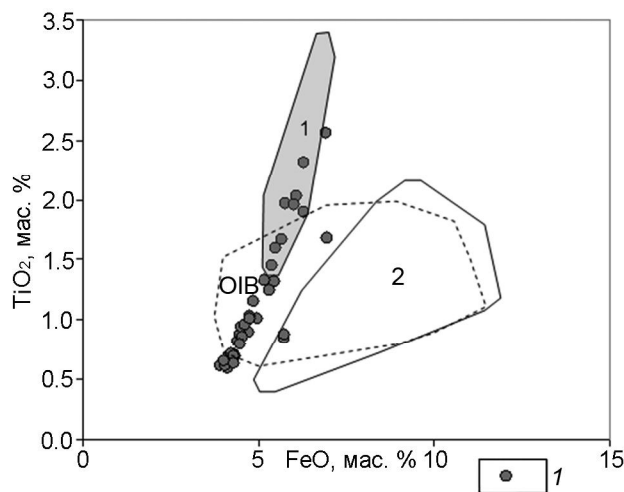


Рис. 5. Диаграмма $TiO_2 - FeO$ для клинопироксенов из меймечитов Сихотэ-Алиня.

1 – клинопироксены из меймечитов района р. Барахты. Поля составов клинопироксенов из меймечитов Сибирской платформы (1), меймечитов Антарктики (2) и базальтов внутриплитных океанических островов (OIB). Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов [9, 25, 27, 30].

(рис. 8), где пироксены района р. Барахты практически идеально соответствуют клинопироксенам из меймечитов Антарктики.

Совершенно новую информацию о содержании редких и редкоземельных элементов удалось получить в результате исследования клинопироксенов из меймечитов района р. Барахта с помощью ион-

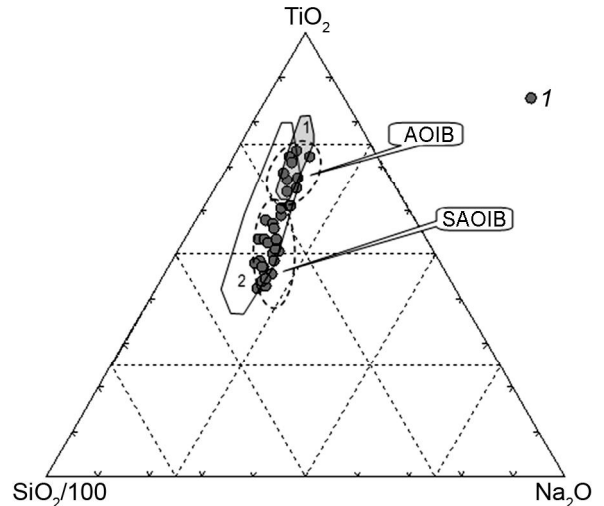


Рис. 6. Диаграмма $SiO_2/100 - TiO_2 - Na_2O$ для клинопироксенов из меймечитов Сихотэ-Алиня.

1 – клинопироксены из меймечитов района р. Барахта. Поля составов клинопироксенов из щелочных (AOIB) и субщелочных (SAOIB) базальтов внутриплитных океанических островов. Остальные условные обозначения см. на рис. 5. Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов [17, 25, 27, 30].

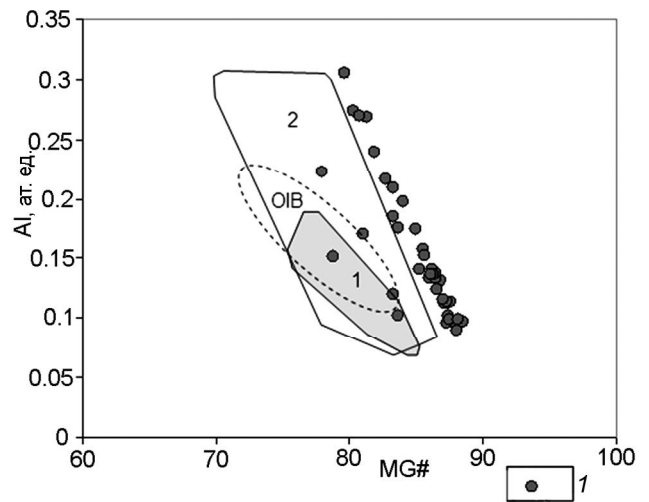


Рис. 7. Диаграмма $Al - Mg\#$ для клинопироксенов из меймечитов Сихотэ-Алиня.

Условные обозначения см. на рис. 5.

ного зонда (табл. 4). Особое значение имеет сравнительный анализ с данными по эталонным объектам (табл. 4), полученными нами в результате изучения на ионном зонде клинопироксенов из пород, представляющих срединно-океанические хребты (Центральная Атлантика), внутриплитные океанические острова (о. Буве, Южная Атлантика) и платформы с платобазальтами (Сибирская платформа).

Таблица 4. Содержание редких и редкоземельных элементов в клинопироксенах из меймечитов Сихотэ-Алиня (г/т).

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Th	0.061	0.037	0.009	0.018	0.064	0.037	0.017	0.020	0.026
Rb	8.53	7.97	5.41	5.88	7.60	6.29	4.59	8.83	8.97
Ba	0.39	0.25	0.15	0.22	0.26	0.11	0.84	1.81	0.53
Sr	68	64	43	52	63	52	12	20	30
V	528	486	208	292	496	286	385	587	391
La	4.34	3.62	1.15	1.78	3.78	1.80	0.65	1.06	2.37
Ce	15.77	13.95	4.29	7.06	14.39	6.94	2.87	4.02	9.48
Nd	19.30	16.70	4.86	7.83	17.08	7.94	4.08	5.42	12.86
Sm	6.88	6.52	1.70	2.89	6.16	2.80	2.19	2.57	5.21
Eu	2.10	1.99	0.59	1.02	2.01	0.95	0.70	0.73	1.61
Gd	7.28	6.22	1.69	2.71	6.89	3.01	2.47	2.99	5.83
Dy	6.19	5.71	1.59	2.59	5.73	2.80	3.05	3.80	6.14
Er	3.09	2.94	0.93	1.36	2.91	1.45	2.18	2.47	3.38
Yb	2.38	2.56	0.66	1.16	2.15	1.19	1.92	2.54	2.85
Y	26.7	24.5	7.1	11.9	24.6	11.8	17.2	22.4	30.1
Zr	76.0	78.8	11.4	25.4	67.0	24.7	16.1	24.2	51.4
Nb	0.80	0.73	0.37	0.50	0.70	0.54	0.21	0.22	0.30
Ta	0.57	0.53	0.13	0.25	0.46	0.24	0.20	0.25	0.41

Примечание. 1–6 – клинопироксены из меймечитов района р. Барахты; 7–9 – клинопироксены: из базальтов типа NMORB Срединно-Атлантического хребта (7), из толеитовых платобазальтов Сибирской платформы (8), из субщелочных базальтов внутриплитных океанических островов типа ОИВ района о. Буве в Южной Атлантике (9).

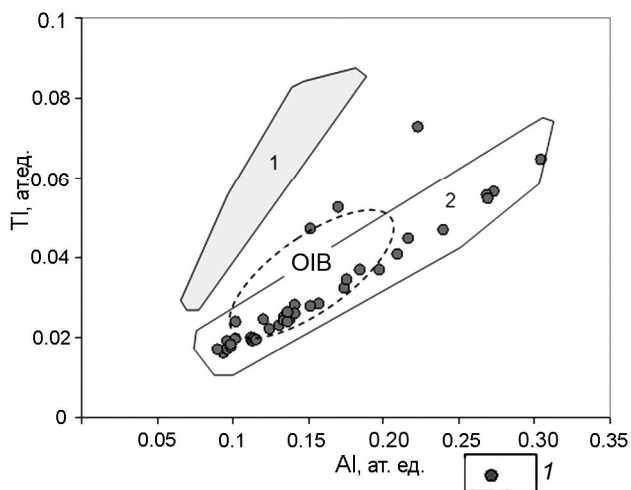


Рис. 8. Диаграмма Ti–Al для клинопироксенов из меймечитов Сихотэ-Алиня.

Условные обозначения см. на рис. 5.

Исследования показали, что по соотношению титана и циркония клинопироксены из меймечитов Сихотэ-Алиня (рис. 9) формируют тренд с накоплением Ti (от 4200 до 13800 г/т) и Zr (от 11.4 до 78.8 г/т). При этом данные по эталонным пироксенам из платобазальтов Сибирской платформы и острова Буве (ОИВ) находятся на этом тренде, располагаясь внутри поля значений для минералов из меймечитов Сихотэ-Алиня (рис. 9).

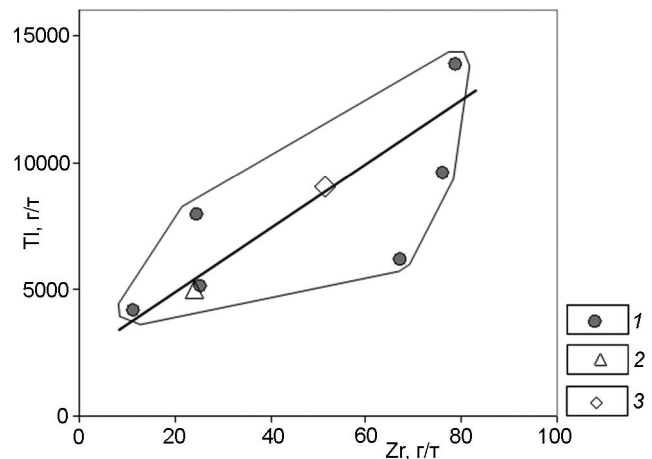


Рис. 9. Диаграмма Ti–Zr для клинопироксенов из меймечитов Сихотэ-Алиня.

1, 2, 3 – клинопироксены: из меймечитов района р. Барахты (1), из толеитовых платобазальтов Сибирской платформы (2), из базальтов внутриплитных океанических островов типа ОИВ (3). Рисунок построен на основе оригинальных данных.

Графики распределения редких и редкоземельных элементов (по отношению к клинопироксену NMORB) для клинопироксенов из меймечитов Сихотэ-Алиня характеризуются сложным видом с хорошо выраженным положительным наклоном в области легких и затем отрицательным наклоном, с падением значений тяжелых лантаноидов. По этим особенно-

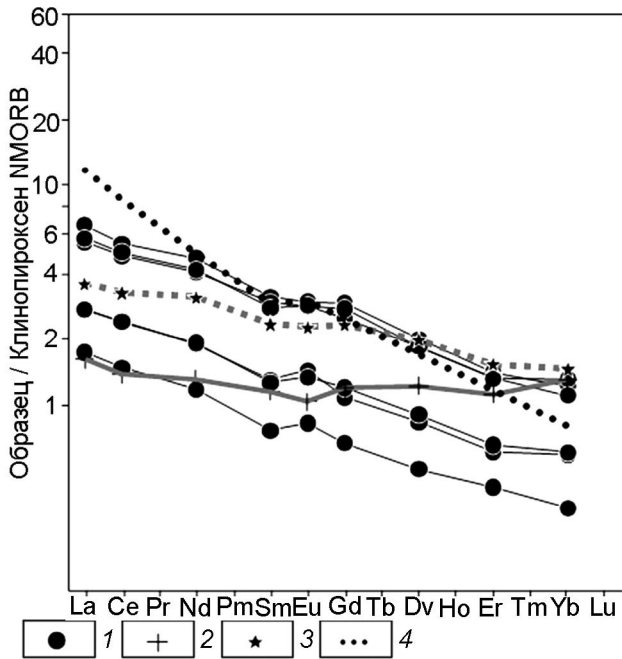


Рис. 10. Распределение редкоземельных элементов в клинопироксенах из меймечитов Сихотэ-Алиня.

1, 2, 3, 4 – клинопироксены: из меймечитов района р. Барахта (1), из толеитовых платобазальтов Сибирской платформы (2), из субщелочных (3) и щелочных (4) базальтов внутриплитных океанических островов типа ОИВ. Значения элементов нормированы к составу клинопироксена из базальта типа NMORB (см. табл. 4). Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов [29].

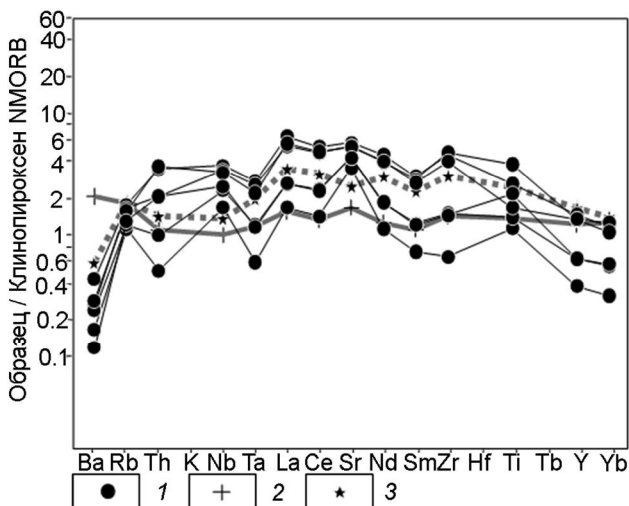


Рис. 11. Спайдер-диаграмма для клинопироксенов из меймечитов Сихотэ-Алиня.

1, 2, 3 – клинопироксены: из меймечитов района р. Барахта (1), из толеитовых платобазальтов Сибирской платформы (2) и из субщелочных базальтов внутриплитных океанических островов типа ОИВ (3). Значения элементов нормированы к составу клинопироксена из базальта типа NMORB (см. табл. 4). Рисунок составлен на основе оригинальных данных.

стям они явно отличаются от трендов пироксенов из щелочных базальтов. Часть редкоземельных спектров клинопироксенов из района р. Барахты (рис. 10, 11) практически совпадают по своей форме и содержанию элементов с таковыми минералов из базальтов типа ОИВ (переходного от нормальных к щелочным) о. Буве (Южная Атлантика). Другие пироксены содержат меньше редкоземельных элементов, что хорошо согласуется в области легких лантаноидов с данными по минералам из толеитовых платобазальтов Сибирской платформы.

Благодаря полученным нами с помощью ионного зонда оригинальным данным по редкоземельным элементам, мы можем провести сравнение клинопироксенов из меймечитов Сихотэ-Алиня с пироксенами из различных современных эталонных ассоциаций. На диаграмме распределения нормированных по клинопироксену из базальтов типа NMORB (табл. 4) значений редкоземельных элементов графики минералов имеют отрицательный наклон (с уменьшением роли тяжелых лантаноидов) и распадаются на две группы. Для спектров с повышенным содержанием элементов характерно сходство со спектрами для пироксенов из обогащенных легкими лантаноидами субщелочных и щелочных базальтов типа ОИВ. Графики с меньшими значениями более близки к трендам по минералам из платобазальтов (рис. 10).

На спайдер-диаграммах значений элементов, нормированных по клинопироксену из базальтов типа NMORB, графики пироксенов из меймечитов Сихотэ-Алиня наиболее близки к спектрам минералов из базальтов типа ОИВ о. Буве (Южная Атлантика). Выделяются, так же как и в случае отдельно взятых редкоземельных элементов, группы с повышенными и пониженными значениями, но имеющие близкие содержания Rb, Nb, Sr и Ti. Для обеих групп характерны минимумы Ba, Ta, Sm, Yb, а также максимумы Nb, La, Sr (рис. 11).

РАСПЛАВНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

Физико-химические параметры магматических процессов формирования меймечитовых комплексов Сихотэ-Алиня были определены с помощью анализа расплавленных включений (табл. 5) в оливинах из образцов, отобранных авторами в районе р. Барахта. Для образцов пород из района р. Катэн использованы ранее полученные нами данные [11].

Необходимо отметить, что в работе основное внимание при термобарогеохимических исследованиях было обращено на включения в оливинах, так как эти минералы являются самыми магнезиальными и ранними фазами при кристаллизации расплавов и соответственно несут важную информацию о наибо-

Таблица 5. Представительные анализы стекол прогретых первичных расплавных включений в оливинах из меймечитов Сихотэ-Алиня (мас. %).

№ п/п	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
1	21	45.70	2.06	10.98	0.15	12.48	0.20	9.07	12.41	2.13	0.33	95.51
2	22	45.88	2.02	10.93	0.14	12.15	0.18	9.02	12.41	1.93	0.32	94.98
3	23	46.50	2.15	11.50	0.13	12.04	0.19	8.30	12.50	2.23	0.35	95.89
4	24	46.28	2.10	11.07	0.15	12.47	0.15	8.73	12.39	2.17	0.32	95.83
5	28	48.31	2.32	13.61	0.11	9.28	0.12	5.34	13.36	2.40	0.35	95.20
6	29	48.15	2.32	14.02	0.05	9.17	0.12	4.94	13.19	2.57	0.38	94.91
7	30	48.32	2.40	13.72	0.07	9.31	0.12	5.28	13.51	2.29	0.35	95.37
8	9	44.17	2.21	12.64	0.10	15.39	0.23	5.98	12.72	2.29	0.48	96.21
9	11	45.02	1.96	12.26	0.14	14.21	0.19	6.25	12.10	2.09	0.68	94.90
10	38	50.76	1.83	11.36	0.17	9.43	0.18	9.84	10.87	2.47	0.29	97.20
11	39	50.44	1.91	11.25	0.19	9.69	0.15	9.65	11.10	2.42	0.30	97.10
12	41	49.37	2.18	12.09	0.31	9.98	0.13	8.69	11.23	2.54	0.31	96.83
13	42	50.12	2.43	12.73	0.23	10.14	0.14	6.42	11.35	2.80	0.35	96.71
14	44	50.32	1.48	12.71	0.19	8.80	0.15	10.23	10.87	3.21	0.17	98.13
15	45	50.31	1.48	12.59	0.17	9.53	0.19	8.91	11.63	3.09	0.17	98.07
16	6	46.89	2.87	11.08	0.06	11.47	0.17	9.45	13.11	1.95	0.18	97.23
17	8	46.67	2.87	10.89	0.07	11.30	0.16	10.11	12.92	1.94	0.18	97.10
18	9	46.40	2.31	8.94	0.15	15.78	0.21	11.21	11.29	1.62	0.36	98.27
19	10	46.42	2.13	8.77	0.19	15.71	0.22	11.64	11.13	1.60	0.35	98.17
20	11	46.30	2.07	8.59	0.18	15.70	0.23	12.67	10.79	1.51	0.36	98.41
21	12	46.26	2.15	8.77	0.17	15.85	0.26	11.83	11.04	1.57	0.35	98.25
22	13	46.79	2.15	8.76	0.17	15.44	0.25	11.98	11.04	1.66	0.37	98.60
23	14	51.30	1.80	11.86	0.10	10.72	0.17	8.95	9.63	2.30	0.46	97.29
24	15	50.91	1.77	11.92	0.09	10.58	0.14	8.75	9.48	2.27	0.48	96.38
25	16	51.61	1.77	12.26	0.09	11.08	0.18	8.49	9.56	2.26	0.44	97.74
26	17	47.56	2.67	10.80	0.10	12.08	0.17	10.07	11.72	2.05	0.62	97.85
27	18	47.10	2.54	10.24	0.10	12.06	0.16	11.26	11.24	2.03	0.60	97.34
28	19	47.72	2.72	11.06	0.10	11.78	0.18	9.90	11.79	2.08	0.67	98.00
29	20	47.14	2.47	10.27	0.09	11.86	0.18	11.59	11.27	1.98	0.56	97.41
30	21	46.86	2.48	10.33	0.08	11.68	0.17	11.82	11.25	2.21	0.58	97.45

Примечание. 1–30 – расплавные включения в оливинах из меймечитов района р. Барахта (1–15) и района р. Катэн (16–30).

лее глубинных и близких к первичным магматических системам, ответственных за формирование меймечитовых комплексов Сихотэ-Алиня.

Первичные расплавные включения (размерами 5–45 мкм) располагаются равномерно во вкрапленниках оливина, либо фиксируют зоны роста. Формы включений округлые с некоторой огранкой, близкой по очертаниям к кристаллам оливина. Включения обычно многофазовые: множество темных и светлых фаз + светлое стекло по краям + шпинель + газовый пузырек (рис. 12).

Экспериментальные исследования в микротермокамере с инертной средой показали, что температуры гомогенизации расплавных включений в оливинах из меймечитов района р. Барахта (1235–1280 °C) практически такие же, как для включений из района р. Катэн – 1235–1285 °C.

Анализ состава прогретых и закаленных расплавных включений в оливинах из меймечитов Сихотэ-Алиня показал, что полученные стекла из по-

род района р. Катэн содержат небольшое количество щелочей (сумма до 2.8 мас. %) и отвечают породам нормальной щелочности. В то же время, в случае меймечитов района р. Барахта присутствует группа стекол с субщелочными характеристиками – субщелочные пикробазальты. На диаграмме FeO/MgO–SiO₂ точки составов расплавных включений из пород р. Катэн располагаются, главным образом, в поле толеитовых серий. В общем, по содержанию SiO₂ (от 43.6 до 47.7 мас. %) и MgO (до 12.7 мас. %) основная группа включений в меймечитах Сихотэ-Алиня отвечает преимущественно оливиновым базальтам, а также пикробазальтам. Часть включений со значениями SiO₂ до 51.6 мас. % соответствует базальтам, а другая часть по относительно высокому содержанию MgO (до 14.1 мас. %) отвечает пикробазальтам. В целом, составы рассмотренных включений наиболее соответствуют данным по включениям в оливинах из пикритов гайота Кастор (Тихий океан), происхождение которых связано с действием вну-

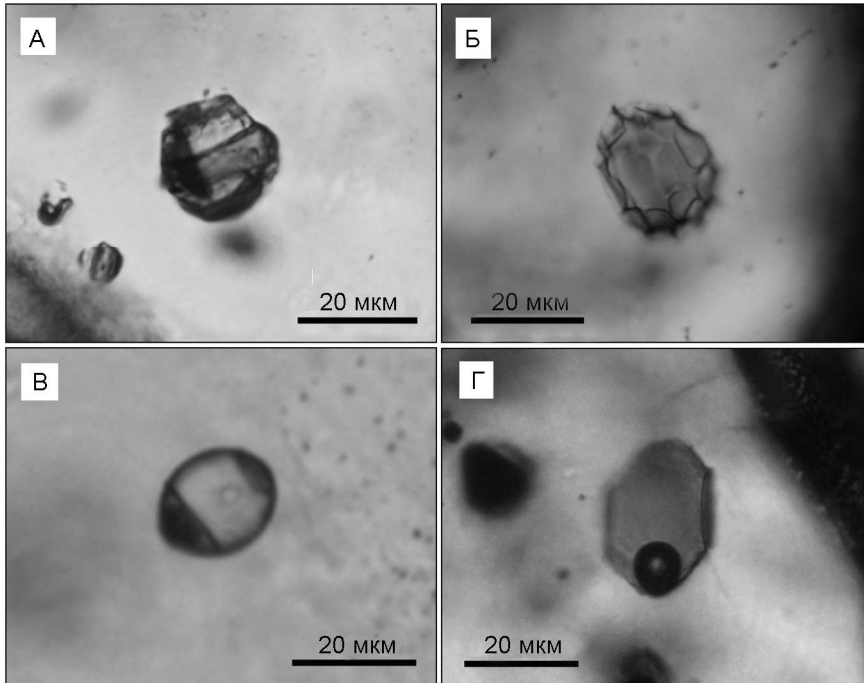


Рис. 12. Фотографии первичных расплавленных включений в оливинах из меймечитов Сихотэ-Алиня.

А, Б – включения в оливинах из меймечитов района р. Барахта.

В, Г – включения в оливинах из меймечитов района р. Катэн.

А, В – не гретые включения до высокотемпературных экспериментов. Б, Г – прогретые и закаленные включения, содержащие гомогенное стекло и газовые пузырьки.

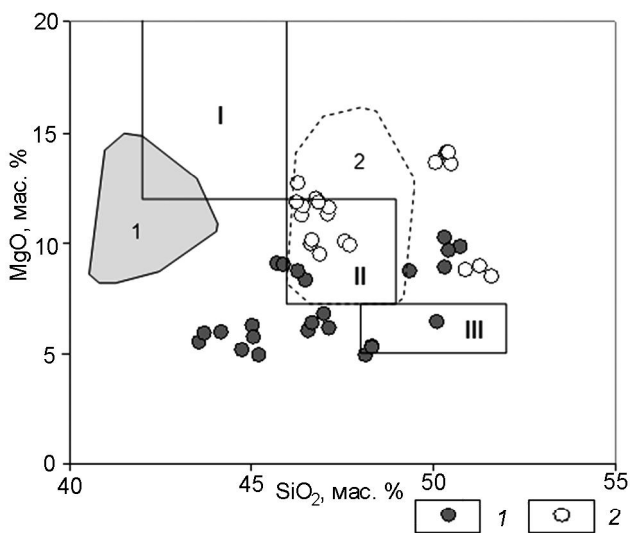


Рис. 13. Диаграмма MgO-SiO_2 для стекол прогретых первичных расплавленных включений в оливинах из меймечитов Сихотэ-Алиня.

1, 2 – расплавленные включения в оливинах из меймечитов районов рек Барахта (1) и Катэн (2). Поля составов расплавленных включений в оливинах из меймечитов Сибирской платформы (1) и из пикритов гайота Кастор, Тихий океан (2). Поля пород: I – пикробазальты, II – оливиновые базальты, III – базальты. Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов [2, 10, 16].

триплитных плюмовых магматических систем типа ОИВ. По содержанию MgO они в целом отвечают расплавленным включениям в оливинах из сибирских меймечитов (рис. 13).

По преобладающим высоким содержаниям титана (2–2.9 мас. %) расплавленные включения в оливинах из меймечитов Сихотэ-Алиня соответствуют плюмовым магматическим системам типа ОИВ. Особенности эволюции расплавов с накоплением титана при росте железистости хорошо видны на диаграмме $\text{TiO}_2\text{-FeO/MgO}$, где все данные разбиваются на три группы: высокотитанистые с минимумом железистости (включения из оливинов района р. Катэн), максимально дифференцированные (включения из оливинов района р. Барахта) и промежуточная группа, в которой участвуют включения из обоих регионов (рис. 14). По соотношениям $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-FeO/MgO}$ основная группа расплавленных включений в оливинах из меймечитов Сихотэ-Алиня располагается на тренде кумуляции оливина с падением железистости и содержания алюминия. К этому же тренду приурочены включения в оливинах из меймечитов Сибирской платформы. Значительная часть включений из меймечитов р. Барахта отвечает остаточным расплавам с ростом железистости до 2.9 (рис. 14). Особенности эволюции расплавов с формированием ультраосновных кумулятов хорошо видны по соотношениям таких элементов, как алюминий, кальций и магний. На диаграммах $(\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO})$ показаны тренды эволюции составов расплавов и пород при кристаллизации расслоенных базит-гипербазитовых комплексов с формированием ультраосновных оливиновых кумулятов. При этом точки расплавленных включений в оливинах располагаются в начале этих трендов, а составы самих меймечитов Сихотэ-Алиня находятся

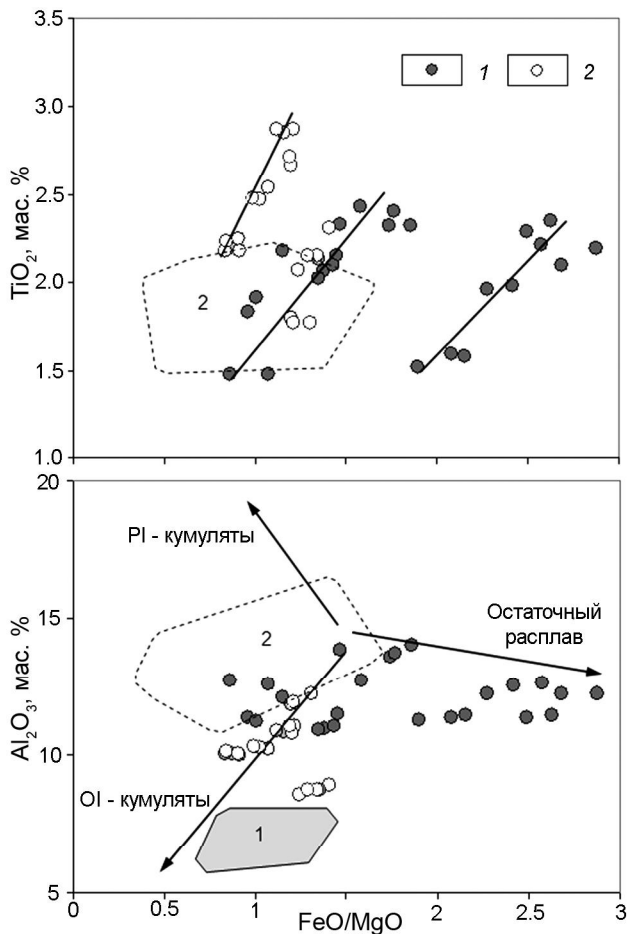


Рис. 14. Зависимость содержаний петрогенных компонентов от значений железистости (FeO/MgO) в стеклах прогретых первичных расплавных включений в оливинах из меймечитов Сихотэ-Алиня.

1, 2 – расплавные включения в оливинах из меймечитов районов рек Барахта (1) и Катэн (2). Поля составов расплавных включений в оливинах из меймечитов Сибирской платформы (1) и из пикритов гайота Кастор, Тихий океан (2). Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов [10, 16].

на окончании, практически совпадая с данными по сибирским меймечитам. Для последних особенности изменения составов от включений к породам практически аналогичны установленным для меймечитов Сихотэ-Алиня. Характерно, что составы собственно меймечитовых пород Сибирской платформы, обладающая широкими вариациями магния, располагаются вдоль тренда, идущего от данных по расплавным включениям и фактически фиксируют путь последовательной кристаллизации ультраосновных кумулятов (рис. 15). Принадлежность меймечитов Сихотэ-Алиня и Сибирской платформы к ультраосновным кумулятам, а также пути эволюции расплавов при

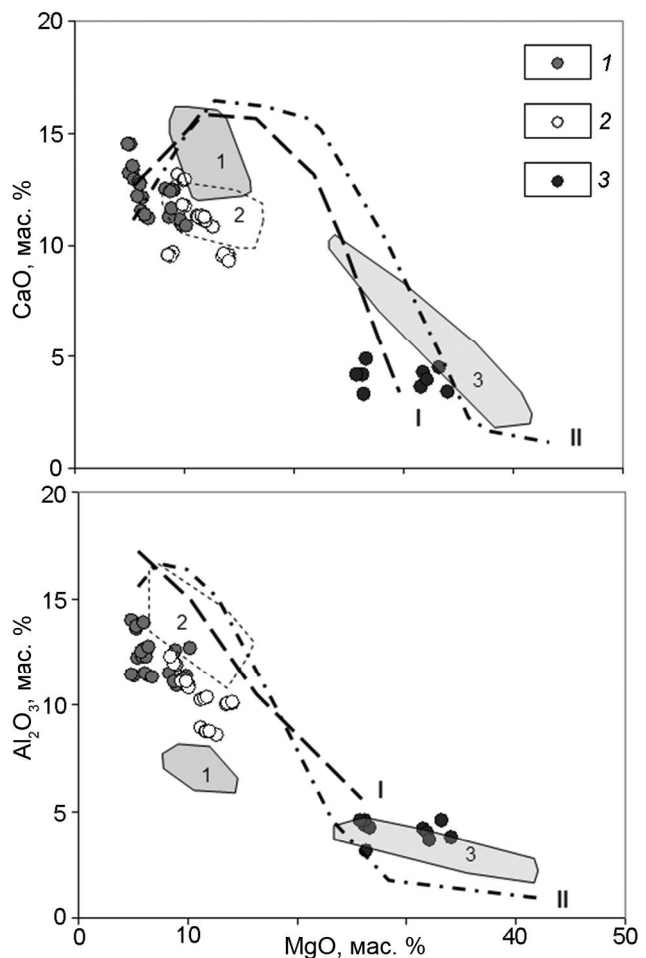


Рис. 15. Зависимость содержаний петрогенных компонентов от значений MgO в стеклах прогретых первичных расплавных включений в оливинах из меймечитов Сихотэ-Алиня.

1, 2 – расплавные включения в оливинах из меймечитов районов рек Барахта (1) и Катэн (2); 3 – составы меймечитов Сихотэ-Алиня. Поля составов расплавных включений в оливинах из меймечитов Сибирской платформы (1) и из пикритов гайота Кастор, Тихий океан (2). 3 – поле меймечитов Сибирской платформы. Тренды для расслоенного кумулятивного Карашатского базит-гипербазитового массива (офиолиты Южной Тувы): I – расплавные включения в хромшпинелидах из дунитов, II – породы расслоенного интрузива. Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов [10, 12, 16, 20, 26, 28].

кристаллизации этих пород хорошо видны на тройной диаграмме $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$ (рис. 16).

Анализ стекол прогретых включений в оливинах расплавных включений с помощью ионного зонда позволил получить информацию о содержании редких, редкоземельных элементов и воды в магматических системах, ответственных за формирование меймечитов Сихотэ-Алиня (табл. 6). На диаграммах с использованием таких устойчивых элементов, как

Таблица 6. Содержание редких, редкоземельных элементов (г/т) и воды (мас.%) в стеклах прогретых первичных расплавленных включений в оливинах из меймечитов Сихотэ-Алиня.

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8
Th	1.12	1.46	0.48	1.00	1.17	0.88	1.36	2.03
Rb	17	18	10	13	22	16	26	22
Ba	83	157	46	86	97	48	71	125
Sr	161	245	452	189	227	242	215	300
V	94	144	91	153	206	256	553	202
La	9.52	12.84	5.94	9.88	12.78	13.71	12.43	21.46
Ce	20.91	30.92	11.56	23.30	28.55	35.99	32.55	49.90
Nd	8.65	20.39	9.00	12.26	17.70	21.77	19.34	24.80
Sm	2.03	3.68	2.07	3.03	4.73	5.45	5.03	5.50
Eu	0.80	1.15	0.75	1.06	1.33	1.61	1.65	1.72
Gd	1.99	3.27	1.95	3.84	3.96	4.90	5.75	4.70
Dy	1.70	2.51	2.09	3.12	3.75	3.83	4.02	4.16
Er	0.64	1.34	1.21	1.69	2.09	2.50	2.20	2.00
Yb	0.97	1.19	1.02	1.31	1.68	1.57	1.62	1.56
Y	7.4	12.0	10.2	13.9	20.2	23.0	21.2	19.6
Zr	57.0	97.1	31.9	69.7	120.8	131.1	129.7	161.3
Nb	12.8	21.2	4.9	12.7	18.4	13.4	14.8	22.5
Ta	1.23	1.04	0.24	0.85	0.94	0.86	0.84	1.02
H ₂ O	0.82	2.45	0.90	0.83	0.02	0.30	0.22	0.28

Примечание. 1–8 – расплавленные включения в оливинах из меймечитов района р. Барахта (1–4) и района р. Катэн (5–8).

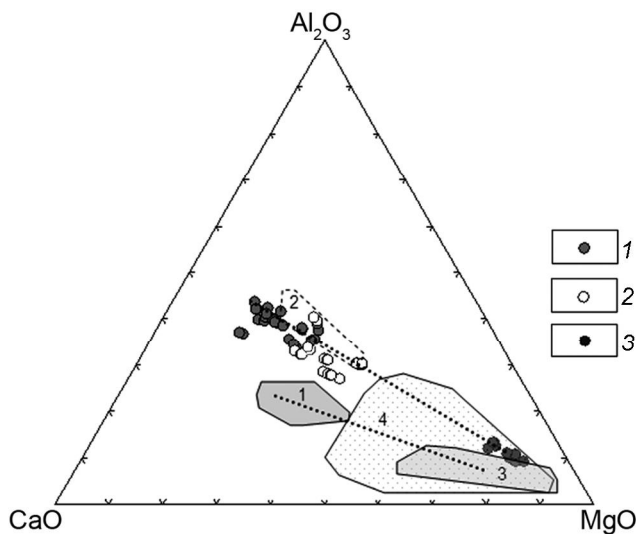


Рис. 16. Диаграмма CaO–Al₂O₃–MgO для стекол прогретых первичных расплавленных включений в оливинах из меймечитов Сихотэ-Алиня.

1, 2 – расплавленные включения в оливинах из меймечитов районов рек Барахта (1) и Катэн (2); 3 – составы меймечитов Сихотэ-Алиня. Поля составов расплавленных включений в оливинах из меймечитов Сибирской платформы (1) и из пикритов гайота Кастор, Тихий океан (2). Поля пород: меймечиты Сибирской платформы (3) и ультраосновные кумуляты из офиолитовых ассоциаций (4). Точечными линиями показаны тренды эволюции составов расплавленных включений, приводящие к кристаллизации ультраосновных (оливиновых) кумулятов. Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов [10, 12, 16, 20, 26, 28].

Zr, Y, Nb, Th (Nb/Y–Zr/Y и Zr/Nb–Nb/Th), расплавленные включения в оливинах меймечитов из Барахтинского и Катэнского районов показывают относительно обогащенный характер составов и располагаются в поле плюмовых базальтов типа OIB (рис. 17, 18).

Графики распределения редкоземельных элементов для стекол прогретых расплавленных включений в оливинах обладают отчетливо выраженным отрицательным наклоном с существенным обогащением легкими лантаноидами. В этом отношении рассмотренные включения близки к включениям из меймечитов Сибирской платформы, хотя содержат меньше редкоземельных элементов. Включения в оливинах района р. Катэн имеют большие концентрации элементов по сравнению с включениями района р. Барахта, и их спектры практически совпадают со спектрами для включений из пикритов гайота Кастор, Тихий океан (рис. 19).

Прямой анализ с помощью ионного зонда содержания летучих компонентов в стеклах прогретых расплавленных включений в оливинах показывает существенные различия в содержании воды в магматических системах районов р. Барахта и р. Катэн. Для первых характерны высокие концентрации H₂O (0.82–0.9 мас. % и до 2.45 мас. %), сравнимые с таковыми для включений в оливинах из меймечитов Сибирской платформы (0.7–1.6 мас. %) [14]. Для вторых (р. Катэн) содержания воды в изученных включениях относительно невысокие – 0.22–0.30 мас. %.

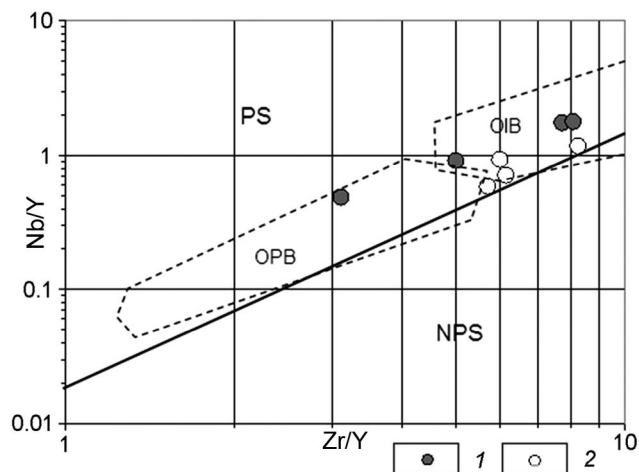


Рис. 17. Диаграмма Nb/Y–Zr/Y для стекол прогретых первичных расплавных включений в оливинах из меймечитов Сихотэ-Алиня.

1, 2 – расплавные включения в оливинах из меймечитов районов рек Барахта (1) и Катэн (2). Области пород с плюмовым мантийным источником (PS) и без плюмового источника (NPS). Поля составов океанических платобазальтов (OPB) и базальтов океанических внутриплитных островов (OIB). Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов [22].

Для уточнения температурного режима кристаллизации меймечитов Сихотэ-Алиня, а также с целью сравнительного анализа с данными по температурам гомогенизации включений, были проведены расчеты по программе PETROLOG [24]. За основу моделирования взяты составы стекол закаленных расплавных включений в оливинах из пород районов р. Барахта и р. Катэн. Использовался буфер QFM. Содержание воды задавалось согласно данным по расплавным включениям. Для района р. Барахта исследования расплавных включений показали, что количество воды в магматических системах в большинстве случаев находится в пределах до 0.9 мас. %. В случае района р. Катэн анализ стекол прогретых включений показал незначительные содержания H_2O (до 0.30 мас. %). Давление, учитывая эффузивный облик пород, задавалось около 1 кбар. Рассчитывались модели ликвидусной кристаллизации на основе всех представленных анализов (в том числе с минимальными и с максимальными значениями MgO) стекол прогретых включений. Для оценки достоверности расчетных температур проводилось сравнение рассчитанных и измеренных составов оливинов-хозяинов и в дальнейшем использовались только те ликвидусные температуры, для которых расчетные значения F_0 в наибольшей мере совпадали с измеренными данными.

В результате моделирования было выяснено, что расчетные ликвидусные температуры кристал-

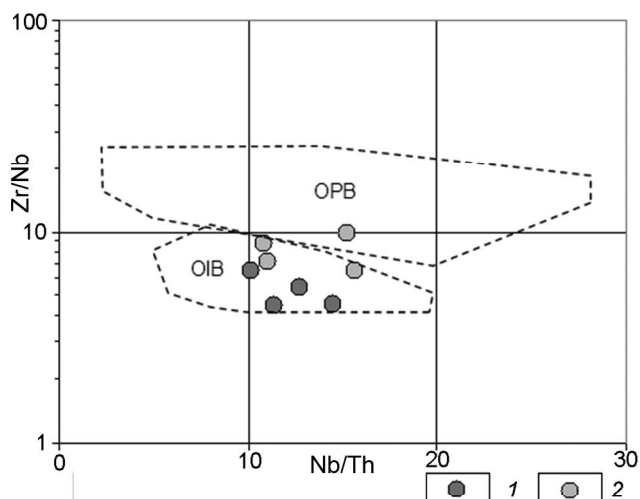


Рис. 18. Диаграмма Zr/Nb – Nb/Th для стекол прогретых первичных расплавных включений в оливинах из меймечитов Сихотэ-Алиня.

1, 2 – расплавные включения в оливинах из меймечитов районов рек Барахта (1) и Катэн (2). Поля составов океанических платобазальтов (OPB) и базальтов океанических внутриплитных островов (OIB). Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов [22].

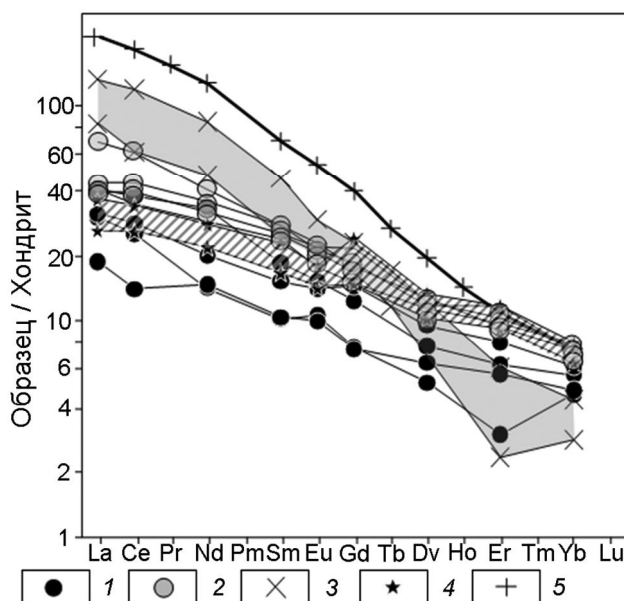


Рис. 19. Распределение редкоземельных элементов в стеклах прогретых первичных расплавных включений в оливинах из меймечитов Сихотэ-Алиня.

1, 2 – расплавные включения в оливинах из меймечитов районов рек Барахта (1) и Катэн (2); 3 – меймечиты Сибирской платформы; 4 – расплавные включения в оливинах из пикритов гайота Кастор, Тихий океан; 5 – нижняя граница данных по расплавным включениям в оливинах из меймечитов Сибирской платформы. Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов [10, 16, 20].

лизации оливинов из меймечитов района р. Барахта составляют 1240–1280 °С, что практически идеально соответствует диапазону температур гомогенизации (1235–1280 °С). При этом расчетные составы оливинов ($F_0 = 83\text{--}89$) хорошо согласуются с реальными: $F_0 = 86\text{--}90$. Для оливинов из меймечитов района р. Катэн определен более широкий интервал расчетных температур (1230–1300 °С) с повышенными значениями максимальных температур по сравнению с данными по району р. Барахта, что хорошо согласуется с относительно более высокими содержаниями магния в расплавленных включениях этого региона. Достоверность этих температур подтверждается сходством расчетных ($F_0 = 82\text{--}86$) и измеренных составов оливинов-хозяинов: $F_0 = 83\text{--}86$. Необходимо отметить, что для оливинов из меймечитов р. Катэн ранее нами были получены с помощью более ранней версии программы PETROLOG [23] несколько меньшие (до 1280 °С) значения расчетных температур. Как показали наши исследования, современный вариант программы PETROLOG [24] позволяет получать наиболее достоверные данные о параметрах магматических систем.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные исследования минералов и находящихся в них расплавленных включений позволили получить значительный объем новой информации об условиях петрогенезиса меймечитовых комплексов Сихотэ-Алиня.

Минералы. Данные о составах оливинов из рассмотренных меймечитов согласуются с данными по оливинам из меймечитов Сибирской платформы и из внутриплитных базальтов, формировавшихся на мощной (более 70 км) литосфере. При этом, к полю составов оливинов сибирских меймечитов приурочены в основном оливины из пород района р. Барахта, а к внутриплитным базальтам – минералы меймечитов р. Катэн.

Поля составов хромшпинелидов из меймечитов Сихотэ-Алиня и Сибирской платформы практически перекрываются по соотношениям основных химических компонентов, тесно ассоциируя с данными по шпинелям из плюмовых базальтов типа ОИВ и из континентальных платобазальтов.

Наиболее информативными оказались исследования клинопироксенов, составы которых чутко реагируют на особенности изменения химического состава магматических систем. Было выяснено, что по основным химическим компонентам фигуративные точки изученных клинопироксенов приурочены к полям минералов из субщелочных и щелочных базальтов внутриплитных океанических островов (ОИВ)

и перекрываются данными по пироксенам из меймечитов Сибири и Антарктики. Это подтверждается информацией о содержании редких и редкоземельных элементов, показывающей сходство с минералами из базальтов типа ОИВ и платобазальтов Сибирской платформы.

В целом, полученная по минералам из ультраосновных пород районов рек Барахта и Катэн информация свидетельствует о сходстве меймечитов Сихотэ-Алиня с фактически эталонными породами Маймеча-Котуйской провинции и об их формировании при участии обогащенных плюмовых магматических систем во внутриплитных условиях.

Расплавленные включения. Эксперименты с расплавленными включениями позволили получить данные о температурах формирования меймечитовых комплексов Сихотэ-Алиня. Было установлено, что температуры гомогенизации расплавленных включений в оливинах из меймечитов района р. Барахта (1235–1280 °С) практически такие же, как для включений из района р. Катэн – 1235–1285 °С. Сопоставляя с расчетными данными для температур кристаллизации оливинов из меймечитов района р. Барахта (1240–1280 °С) и района р. Катэн (1230–1300 °С), можно более обоснованно оценить температурный режим петрогенезиса меймечитовых комплексов Сихотэ-Алиня. Таким образом, кристаллизация оливинов меймечитов района р. Барахта происходила наиболее вероятно при температурах 1235–1280 °С, а для оливинов меймечитов района р. Катэн устанавливается расширенный диапазон с более высокими максимальными температурами: 1230–1300 °С.

Анализ стекол закаленных первичных расплавленных включений в оливинах дал возможность получить прямую информацию о геохимии расплавов, ответственных за формирование меймечитовых комплексов Сихотэ-Алиня. По химическому составу основная группа включений в меймечитах Сихотэ-Алиня соответствует преимущественно оливиновым базальтам, а также пикробазальтам. Сравнивая полученные результаты по Сихотэ-Алиню с информацией по Сибирской платформе [16], видим, что по содержанию MgO , CaO , Na_2O включения в оливинах из меймечитов обоих регионов сходны, существенно различаясь по SiO_2 , TiO_2 , K_2O .

В общем, по петрохимическим особенностям рассмотренных включений отчетливо видно, что расплавы, из которых кристаллизовались оливины меймечитов Сихотэ-Алиня, отвечали по составу преимущественно оливиновым базальтам и пикробазальтам, в то время как меймечиты, содержащие данные минералы гораздо более магнезиальны. Подобные факты о

значительно меньших количествах MgO во включениях в оливинах по сравнению с содержащими эти минералы ультраосновными эффузивами устанавливались и ранее, в том числе для пикритов гайота Кастор в западной части Тихого океана [10] и меймечитов Сибирской платформы [16]. Эти особенности свидетельствуют об активных процессах кумуляции оливина, приводивших к формированию высокомагнезиальных ультраосновных пород. О кумулятивном происхождении меймечитов Сихотэ-Алиня свидетельствуют диаграммы с участием таких компонентов, как CaO, Al₂O₃, MgO, а также кумулятивные структуры с округло-ограниченными кристаллами-вкрапленниками оливина (рис. 2).

В целом, данные по петрохимии и геохимии редких, редкоземельных элементов в расплавленных включениях прямо свидетельствуют об активном участии обогащенных плюмовых магматических систем при формировании меймечитов Сихотэ-Алиня.

ВЫВОДЫ

1. Исследования расплавленных включений и минералов позволили получить прямую информацию о физико-химических условиях петрогенезиса меймечитовых комплексов Сихотэ-Алиня.

2. Полученные по минералам из ультраосновных пород районов рек Барахта и Катэн данные свидетельствуют о сходстве меймечитов Сихотэ-Алиня с эталонными породами Маймеча-Котуйской провинции и об их формировании при участии обогащенных плюмовых магматических систем во внутриплитных условиях.

3. Эксперименты с расплавленными включениями в оливинах и расчетное моделирование по программе PETROLOG [24] на основе данных по составам стекол прогретых включений показали определенные различия температурных режимов магматических систем, формировавших меймечиты района р. Барахта (1235–1280 °С) и района р. Катэн (1230–1300 °С).

4. Исследования включений в оливинах свидетельствуют о том, что кристаллизация рассмотренных меймечитов Сихотэ-Алиня происходила из базальтоидных расплавов (соответствующих по химическому составу оливиновым базальтам и пикробазальтам) в результате кумуляции оливинов.

5. Данные по особенностям распределения редких, редкоземельных элементов и титана в расплавленных включениях свидетельствуют об активном участии плюмовых магматических систем при формировании меймечитовых комплексов Сихотэ-Алиня.

6. Прямой анализ с помощью ионного зонда содержания летучих компонентов в стеклах прогретых расплавленных включений в оливинах показывает суще-

ственные различия в содержании воды в магматических системах, формировавших меймечиты районов р. Барахта (0.82–0.9 мас.% и до 2.45 мас.%) и р. Катэн (0.22–0.30 мас.%).

Работа выполнена при поддержке Проекта РФФИ № 12-05-00959 и интеграционного проекта 12-П-СУ-08-012 и при поддержке Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зимин С.С., Старков Г.Н., Щека С.А., Погорелова М.Г. О находке меймечитов в Главном антиклинории Сихотэ-Алиня // Вопросы геологии и рудоносности Дальнего Востока. Владивосток, 1965. С. 194–195.
2. Магматические горные породы. Т. 1. М.: Наука, 1983. 766 с.
3. Приходько В.С., Бехтольд А.Ф., Бердников Н.В. Глубинная петрология активных континентальных окраин. М.: Наука, 1985. 152 с.
4. Рябчиков И.Д., Соловова И.П., Когарко Л.Н., Брай Г.П., Нтафлос Т., Симакин С.Г. Термодинамические параметры генерации меймечитов и щелочных пикритов Маймеча-Котуйской провинции (по данным изучения расплавленных микровключений) // Геохимия. 2002. № 11. С. 1139–1150.
5. Рябчиков И.Д. Механизмы и условия магнообразования в мантийных плюмах // Петрология. 2003. Т. 11, № 6. С. 548–555.
6. Рябчиков И.Д. Мантийные магмы – сенсор состава глубинных геосфер // Геология руд. месторождений. 2005. Т. 47, № 6. С. 501–515.
7. Рябчиков И.Д., Когарко Л.Н., Соловова И.П. Физико-химические условия магнообразования в основании Сибирского плюма по данным исследования расплавленных микровключений в меймечитах и щелочных пикритах Маймеча-Котуйской провинции // Петрология. 2009. Т. 17, № 3. С. 311–322.
8. Симонов В.А. Петрогенезис офиолитов (термобарогеохимические исследования). Новосибирск: Изд-во ОИГГМ СО РАН, 1993. 247 с.
9. Симонов В.А., Пейве А.А., Колобов В.Ю., Тихунов Ю.В. Геохимия и геодинамика базитов в районе тройного сочленения Буве // Петрология. 2000. Т. 8, № 1. С. 43–58.
10. Симонов В.А., Ковязин С.В., Колобов В.Ю. Физико-химические параметры магматических систем гайота Кастор (Тихий океан) // Докл. РАН. 2004. Т. 398, № 4. С. 529–532.
11. Симонов В.А., Щека С.А., Ковязин С.В. Физико-химические параметры формирования пикрит-меймечитовых комплексов Сихотэ-Алиня // Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. С. 246–250.
12. Симонов В.А., Шелепаев Р.А., Котляров А.В. Физико-химические параметры формирования расслоенного габбро-гипербазитового комплекса в офиолитах Южной Тувы // Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения: Материалы третьей междунар. конф. Екатеринбург: Ин-т геологии и геохимии УрО РАН, 2009. Т. 2. С. 195–198.
13. Симонов В.А., Приходько В.С., Ковязин С.В., Тарнавский А.В. Условия кристаллизации дунитов Кондерского платиноносного щелочно-ультрамафитового массива, юго-

- восток Алданского щита // Тихоокеан. геология. 2010. Т. 29, № 5. С. 82–93.
14. Соболев А.В., Слущкий А.Б. Состав и условия кристаллизации исходного расплава сибирских меймечитов в связи с общей проблемой ультраосновных магм // Геология и геофизика. 1984. № 12. С. 97–110.
 15. Соболев А.В. Включения расплавов в минералах как источник принципиальной петрологической информации // Петрология. 1996. Т. 4, № 3. С. 228–239.
 16. Соболев А.В., Соболев С.В., Кузьмин Д.В., Малич К.Н., Петрунин А.Г. Механизм образования Сибирских меймечитов и природа их связи с траппами и кимберлитами // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 12. С. 1293–1334.
 17. Цамерян О.П., Соболев А.В., Закариадзе Г.С. Применение данных по минералогии вкрапленников для типизации офиолитовых вулканических серий Малого Кавказа // Геохимия. 1991. № 11. С. 1561–1572.
 18. Щека С.А. Меймечит-пикритовый комплекс Сихотэ-Алиня // Докл. АН СССР. 1977. Т. 234, № 2. С. 444–447.
 19. Щека С.А., Вржосек А.А. Ультраосновной вулканизм тихоокеанского пояса и вопросы систематики меймечитов и коматиитов // Вулканология и сейсмология. 1983. № 3. С. 3–15.
 20. Arndt N.T., Lehnert (Katz) K., Vasiliev Yu.R. Meimechites highly magnesian lithosphere-contaminated alkaline magmas from deep subcontinental mantle // LITHOS. 1995. V. 34. P. 41–59.
 21. Batanova V.G., Pertsev A.N., Kamenevsky V.S., Ariskin A.A., Mochalov A.G., Sobolev A.V. Crustal evolution of island-arc ultramafic magma: Galmornan pyroxenite-dunite plutonic complex, Koryak Highland (Far East Russia) // Journ. Petrology. 2005. doi: 10.1093/petrology/egi018
 22. Condie K.C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // Lithos. 2005. V. 79. P. 491–504.
 23. Danyushevsky L.V. The effect of small amounts of H₂O on crystallisation of mid-ocean ridge and backarc basin magmas // J. Volcan. Geoth. Res. 2001. V. 110, N 3–4. P. 265–280.
 24. Danyushevsky L.V., Plechov P.Yu. Petrolog: Integrated software for modeling crystallization processes // Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 29 July 2011. 2011. V. 12, N 7. Q07021, doi: 10.1029/2011GC003516.
 25. Elkins T.L.T., Draper D.S., Agee C.B., Jewell J., Thorpe R.I., Hess P.C. The last lavas erupted during the main phase of the Siberian flood volcanic province: results from experimental petrology // Contrib. Mineral. Petrol. 2007. V. 153. P. 191–209.
 26. Fedorenko V.A., Czamanske G.K. Results of new field and geochemical studies of the volcanic and intrusive rocks of the Maimecha-Kotuy area, Siberian flood basalt province, Russia // Int. Geol. Rev. 1997. V. 39. P. 479–531.
 27. Heinonen J.S., Luttinen A.V. Mineral chemical evidence for extremely magnesian subalkaline melts from the Antarctic extension of the Karoo Large igneous province // Mineral. Petrol. 2010. V. 99. P. 201–217.
 28. Kogarko L.N., Ryabchikov I.D. Geochemical evidence for meimechite magma generation in the subcontinental lithosphere of Polar Siberia // J. Asian Earth Sci. 2000. V 18. P. 195–203.
 29. Nagasawa H., Schnetzler C.C. Partitioning of rare earth, alkali and alkaline earth elements between phenocrysts acidic igneous magma // Geochim. Cosmochim. Acta. 1971. V. 35, N. 9. P. 953–968.
 30. Ryabchikov I.D., Kogarko L.N., Solovova I.P. Physicochemical conditions of magma formation at the base of the Siberian plume: insight from the investigation of melt inclusions in the meimechites and alkali picrites of the Maimecha-Kotui Province // Petrology. 2009. V. 17. P. 287–299.
 31. Sobolev A.V., Danyushevsky L.V. Petrology and geochemistry of boninites from the north termination of the Tonga Trench: Constraints on the generation conditions of primary high-Ca boninite magmas // J. Petrol. 1994. V. 35. P. 1183–1211.
 32. Voinova I.P., Prikhodko V.S. Meimechites in Central Sikhote Alin // Deep-seated magmatism, magmatic sources and the problem of plumes / Proc. of International Workshop. Vladivostok: Dalnauka, 2002. P. 223–229.

Рекомендована к печати В.Г. Сахно

V.A. Simonov, V.S. Prikhodko, S.V. Kovyazin, A.V. Kotlyarov Petrogenesis of meimechites from Sikhote-Alin from melt inclusions

New information on the physical-chemical conditions of the petrogenesis of meimechites from Sikhote-Alin has been obtained from studying the composition of minerals and melt inclusions. The data on the composition of minerals of subvolcanic and ultrabasic rocks from two localities (the Anyui and Katen river basins) indicate the similarity of the meimechites under study with standard rocks of the Maimecha-Kotui province and their formation in the intraplate conditions. Experiments carried out with melt inclusions in olivines and also calculation modeling based on the compositions of glass impurities reveal slight differences in temperature regimes of the magmatic systems which formed meimechites from the localities along the Anyui river (1235–1280° C) and Katen river (1230–1300 °C). The olivine inclusions were studied and it was shown that crystallization of meimechites from Sikhote-Alin originated from basaltic melts, the chemical composition of which is identical to olivine basalts and picrobasalts, as a result of olivine cumulation. Data on the specific distribution features of titanium, rare and rare earth elements in the melt inclusions testify that plume magmatic systems took an active part in the formation of the meimechite complexes in Sikhote-Alin. A direct analysis with ion probe of the content of the volatile components in the glasses of heated melt inclusions in olivines revealed substantial differences in the water content in the magmatic systems forming meimechites of the Anyui (0.82–0.9 wt % up to 2.45 wt%) and Katen (0.22–0.30 wt %) river basins.

Key words: melt inclusions, petrogenesis, meimechites, Sikhote-Alin.