

ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

УДК 548.4+552.335.5

ЩЕЛОЧНЫЕ ГАББРОИДЫ ПРОЯВЛЕНИЯ ЧИРИЙ (Северо-Минусинская впадина):
МИНЕРАЛОГИЯ И ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ РАСПЛАВА

Т.Ю. Тимина, В.В. Шарыгин

Институт геологии и минералогии СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

Работа посвящена изучению химизма породообразующих минералов габброидов проявления Чирий и выявлению особенностей эволюции исходного базитового расплава в процессе кристаллизации этих пород. Полученные результаты сопоставлены с таковыми для базанитов трубок взрыва Северо-Минусинской впадины. Детально рассмотрена минералогия и термобарогеохимия габброидов проявления. Приведены химические анализы породообразующих минералов (клинопироксен, плагиоклаз, амфибол, биотит, титаномagnetит, апатит). По температурам гомогенизации первичных расплавных включений в минералах установлены минимальные температуры их кристаллизации. Порядок начала кристаллизации минералов габброидов был следующим: клинопироксен ($T > 1160$ °C), плагиоклаз, магнетит → амфибол ($T > 950$ °C) → биотит. Кристаллизация пород происходила в приповерхностных условиях. Термометрические данные подтверждаются результатами, полученными при численном моделировании равновесной кристаллизации габброидов. В процессе кристаллизации исходного базитового расплава происходило накопление SiO_2 , Al_2O_3 , щелочей и Cl и снижение феррических компонентов. Эволюция исходного расплава была направлена в сторону гранодиоритовых и щелочно-сиенитовых составов. По сравнению с базанитами из трубок взрыва исходный расплав габброидов претерпел более длительную эволюцию. Геохимические особенности габброидов проявления указывают на то, что габброиды и базаниты трубок взрыва данного региона кристаллизовались из одного интратрипличного щелочно-базальтоидного класса магм. Однако по петрохимическим и минералогическим характеристикам габброиды проявления Чирий существенно отличаются от базанитов трубок взрыва.

Минералогия, химизм минералов, включения расплава, эволюция расплава, габброиды, Северо-Минусинская впадина.

ALKALINE GABBROIDS OF THE CHIRII OUTCROP (North Minusa depression):
MINERALOGY AND MELT EVOLUTION

T.Yu. Timina and V.V. Sharygin

We studied the chemical composition of rock-forming minerals in gabbroids from the Chirii outcrop and the evolutionary features of parental basic melt during the crystallization of these rocks. Results were compared with data for basanites from pipes of the North Minusa depression. The mineralogical composition and thermobarogeochemical data on the gabbroids were examined in detail, and chemical analyses of rock-forming minerals (clinopyroxene, plagioclase, amphibole, biotite, titanomagnetite, and apatite) were carried out. Based on the homogenization temperatures of primary melt inclusions, we established the minimum temperatures and sequence of mineral crystallization in the gabbroids: clinopyroxene ($T > 1160$ °C), plagioclase, magnetite → amphibole ($T > 950$ °C) → biotite. The rock crystallization proceeded at shallow depths. Thermometric data are confirmed by results of modeling of equilibrium gabbroid crystallization. The crystallization of parental basic melt was accompanied by the accumulation of SiO_2 , Al_2O_3 , alkalis, and Cl and depletion in ferric components. The melt evolved to granodiorite and alkali-syenite compositions. Compared with basanites from pipes, the parental melt had a longer evolution. The geochemical features of the gabbroids indicate that they, like basanites, crystallized from intraplate alkali-basaltoid magmas. But in petrochemistry and mineralogy the Chirii gabbroids differ considerably from the pipe basanites.

Mineralogy, mineral chemistry, melt inclusions, melt evolution, gabbroids, North-Minusa depression

ВВЕДЕНИЕ

Проявления мезозойского и кайнозойского щелочно-базальтоидного вулканизма широко распространены в Центрально-Азиатской складчатой области, включающей южные территории Сибири, в том числе и Хакасию, где расположены многочисленные вулканические трубки с глубинными ксенолитами. Эти образования связаны с этапом новейшей тектономагматической активизации региона, которая наиболее интенсивно развивалась в течение кайнозойского времени, но ее первые признаки локально фиксируются уже в конце мезозоя. Ведущим тектоническим процессом, обусловившим магматизм, был рифтогенез континентальной литосферы, сопровождающийся щелочно-базальтовым вулканизмом [Луцицкий, 1960; Соболев и др., 1988].

Среди продуктов магматической деятельности в пределах Северо-Минусинской впадины принято выделять излившиеся и гипабиссальные базальты девонского возраста, распространенные на территории всего Минусинского прогиба, дайковый комплекс пермотриасового возраста и поздне меловые базаниты из трубок взрыва.

Мезозойские вулканисты прорывают самые молодые в районе терригенные отложения девона и карбона. На этом основании первые исследователи определяли возраст этих вулканических пород в

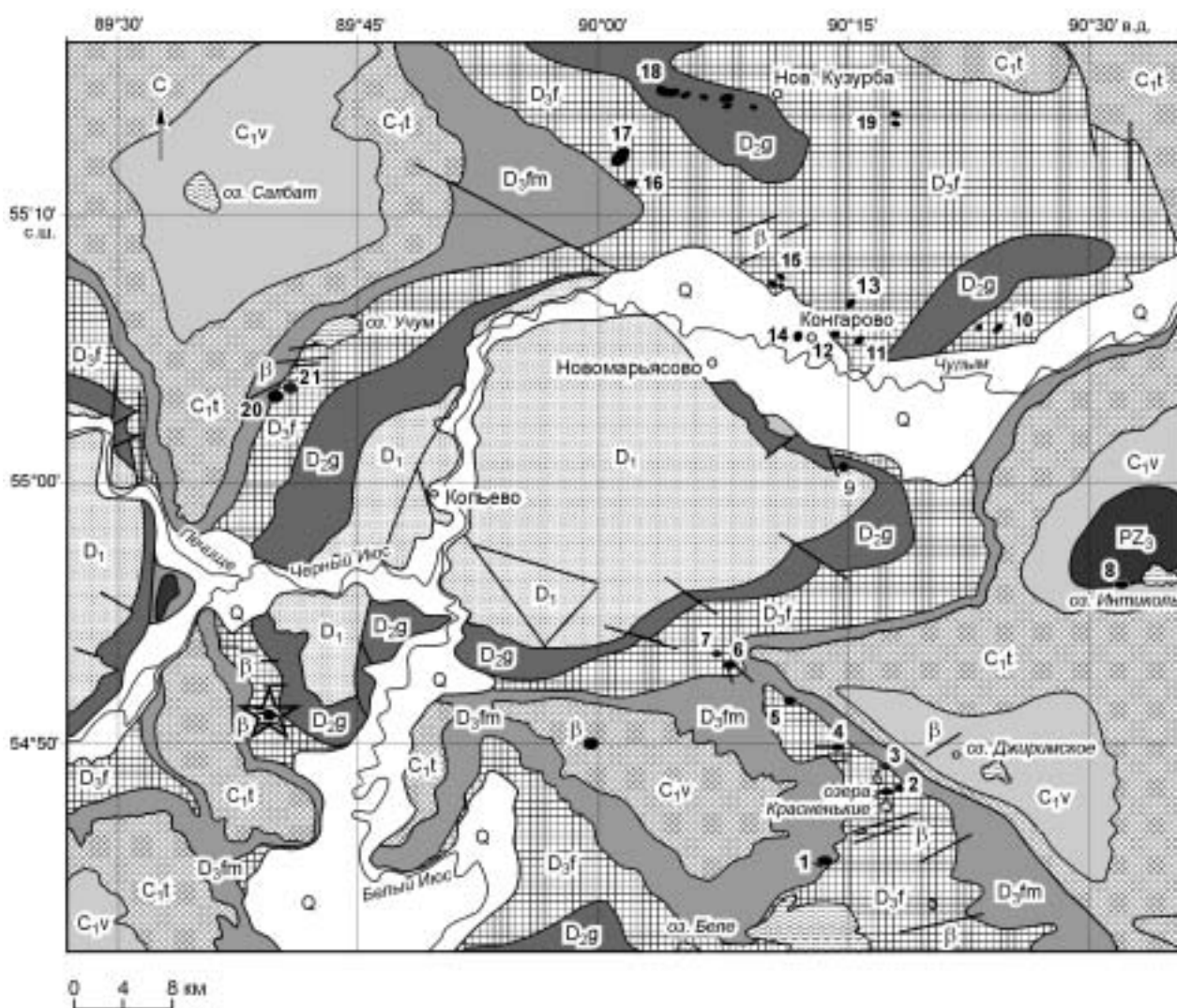


Рис. 1. Геологическая схема Северо-Минусинской впадины [Луцицкий, 1960; Мальковец, 2001].

D₁ — основные щелочные эффузивы, D_{2g} — конгломераты, песчаники, D_{3f} — песчаники, алевролиты, аргиллиты, D_{3fm} — песчаники, алевролиты, аргиллиты, C_{1t} — песчаники, алевролиты, известняки, C_{1v} — песчаники и углистые алевролиты, PZ₃ — песчаники, алевролиты, аргиллиты, Q — четвертичные отложения, β — тела щелочных базальтоидов: вулканические трубки, дайки. Вулканические трубки: 1 — Беле, 2 — Краснозерская, 3 — Джирим, 4 — Чебалдак, 5 — Тергешская, 6 — Точильная, 7 — Придорожная, 8 — Интиколь, 9 — Бараджульская, 10 — Додонков, 11 — Сестра, 12 — Клад, 13 — высота 465 м, 14 — Конгаровская, 15 — Три Брата, 16 — Ботиха, 17 — Ужур, 18 — Новая Кузурба (приповерхностная интрузия), 19 — Париллов, 20 — Камыштинская-1, 21 — Камыштинская-2. Звездочка — проявление Чирий.

интервале поздняя пермь—триас [Лучицкий, 1960; Крюков, 1968]. Проведенные в последние годы комплексные геохимические, радиологические и палеомагнитные исследования даек оливиновых долеритов Копьевского поднятия Северо-Минусинской впадины определили пермотриасовое время образования дайковой ассоциации (262 ± 2.5 млн лет) [Мальковец, 2001] и более молодой возраст базанитовых трубок. Согласно недавним Ar-Ar датировкам, возраст для базанитов трубок взрыва соответствует интервалу от 74 до 81 млн лет [Брагин и др., 1999].

Большинство вулканических трубок и даек сгруппированы по периферии Копьевского куполовидного поднятия, расположенного в центральной части Северо-Минусинской впадины [Лучицкий, 1960; Крюков, 1963, 1964а,б, 1968]. Трубки взрыва и дайки сосредоточены вдоль флексур и разломов, уходящих в глубь фундамента и использующих ослабленные зоны, сформированные за счет интенсивного раздробления залегающего в их основании древнего складчатого фундамента. Географически в пределах Северо-Минусинской впадины условно можно выделить две группы трубок взрыва базанитов, в которых сконцентрировано более 20 вулканических и вулканоплутонических тел: южную (Беле, Красноозерская, Джирим, Чебалдак, Тергешская, Точильная и Придорожная) и северную (Конгаровская, Три Брата, Сестра, Клад, Ужур, Ботиха, Новая Кузурба). Несколько обособленно располагаются трубки Камыштинская-1, -2 и Интиколь, а также проявление Чирий, которое находится на территории заповедника Чазы, на участке Подзаплатские болота, и расположено в 20 км к юго-западу от пос. Копьево (Республика Хакасия) (рис. 1). Оно представляет собой небольшую сопку, на запад от которой простирается дайка. Породы этого проявления исторически принято относить к базанитам из верхнемеловых трубок взрыва Северо-Минусинской впадины, поскольку это проявление так же, как и вулканические трубки, располагается на периферии Копьевского антиклинального поднятия. Однако по минеральному составу и структуре эти породы существенно отличаются от базанитов трубок взрыва. Данные о строении, возрасте и минералогии проявления Чирий отсутствуют: это тело было обнаружено при картировании района и ранее не изучалось. Исследование таких малых магматических тел в пределах Северо-Минусинской впадины очень важно, поскольку большинство таких проявлений не изучались и были лишь условно отнесены при картировании к трубкам мелового возраста. Данная работа посвящена минералогическим и термобарогеохимическим исследованиям габброидов проявления Чирий и их возможной генетической связи с трубками взрыва базанитового состава.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Валовой состав пород проявления Чирий определяли рентгенофлюоресцентным анализом (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск), содержания воды и CO_2 — „мокрой“ химией. Анализ микроэлементного и редкоземельного составов габброидов проводился масс-спектрометрией с индукционно-связанной плазмой (Институт геохимии СО РАН, г. Иркутск).

Изучение состава минералов габброидов и включений расплава (стекла прогретых и непрогретых включений, дочерние фазы непрогретых включений) проводилось на рентгеноспектральном микроанализаторе Camebax-Micro (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск) в режиме глубокого охлаждения. Параметры съемки: $I = 25\text{—}40$ нА, $V = 20$ кВ, $t = 30\text{—}40$ с, размер пучка зонда — 2—3 мкм. Для микрозондового анализа подбирались включения расплава размером более 10 мкм. Следует отметить, что при анализе стекол происходило выгорание щелочей (главным образом Na_2O). Это приводило к их занижению при анализе и немного влияло на завышение концентраций SiO_2 и Al_2O_3 . В случае крупных включений (>20 мкм) этого иногда удавалось избежать за счет незначительного сканирования стекла микрозондовым пучком. По возможности анализ проводился более широким пучком (диаметром до 5 мкм), однако при этом для мелких включений существует большая вероятность захвата минерала-хозяина.

Микроэлементный состав породообразующих минералов, а также дочерних фаз и остаточных стекол из расплавленных включений анализировался методом вторично-ионной масс-спектрометрии (SIMS) на ионном зонде Cameca IMS-4f в Институте микроэлектроники и информатики РАН (г. Ярославль). Для анализа подбирались объекты размером более 20 мкм. При анализе примесных элементов (Be, Li, B, Cr, V, Rb, Ba, Th, U, Nb, Hf, Sr, Zr, Y, REE) и Ti применялась методика энергетического фильтра при следующих параметрах: размер первичного пучка ионов O^{2-} — 20 мкм, I — 2—4 нА, энергетический офсет — 100 эВ, ширина энергетической щели — 50 эВ. Концентрации элементов определялись на основе отношений соответствующих изотопов к ^{30}Si по калибровочным кривым, построенным для заверенных стандартов [Jochum et al., 2000]. Определение H_2O проводилось по массе ^1H в едином аналитическом цикле с примесными элементами. Низкие фоновые содержания воды в приборе (0.03 мас.%) достигались за счет выдержки образцов в условиях высокого вакуума в течение 24 ч. Условия анализа F описаны в работе [Портнягин и др., 2002].

Термометрические исследования включений расплава в минералах проводились двумя способами: с визуальным контролем и без него. Для изучения включений с визуальным контролем использовалась термокамера с воздушной средой [Михайлов, Шацкий, 1975]. Для этих экспериментов отбирались зерна

клинопироксена и амфибола без каких-либо фрагментов основной массы. С помощью этого метода определялись температуры исчезновения дочерних фаз во включениях и температуры гомогенизации включений. При нагревании последних в клинопироксене происходило потемнение минерала-хозяина (вследствие его окисления из-за высокой железистости), однако несмотря на это удалось определить температуру гомогенизации расплавных включений в клинопироксене. Высокотемпературные эксперименты без визуального контроля проводились только для включений в клинопироксене. Для этого из трех фракций дробленной породы (>0.5, 0.5—0.4, 0.4—0.25; обр. Chi-0, Chi-D) отбирались чистые зерна клинопироксена без основной массы и без каких-либо признаков вторичных изменений. Отобранные зерна загружались в алундовую капсулу с графитовой крышкой, а затем помещались в термокамеру с аргоновой газовой средой, сконструированной в ИМП СО РАН [Петрушин и др., 2003]. Зерна прогревались в интервале температур, близких к температуре гомогенизации, с 20-минутной выдержкой в каждом эксперименте. Прогрев происходил вслепую, затем зерна закалялись за счет резкого сброса температуры. Для дальнейших исследований на микрозонде прогретые включения выводились на поверхность с помощью алмазных паст.

МИНЕРАЛОГИЯ И ПЕТРОГРАФИЯ ГАББРОИДОВ ПРОЯВЛЕНИЯ ЧИРИЙ

Породы проявления Чирий полностью раскристаллизованные. По составу они относятся к субщелочным габброидам. Субщелочной характер отражается в присутствии титанистой роговой обманки и биотита в значительных количествах и появлении нормативного нефелина в составе пород (табл. 1). Текстура пород — массивная, структура — порфирировая, среднезернистая. На фоне среднезернистой основной массы выделяются редкие вкрапленники плагиоклаза

(An_{55-45}), клинопироксена (авгита) и амфибола (Ti-роговой обманки). Основная масса состоит из плагиоклаза, амфибола, клинопироксена, биотита, апатита и магнетита. Вторичные минералы сильно развиты и представлены кальцитом, палагонитом, хлоритом, встречающимися в интерстициях между минералами, серицитом, замещающим плагиоклаз, гематитом, развивающимся по магнетиту.

Вкрапленники **клинопироксена** представлены зеленовато-коричневыми зернами размером до 2 мм. Плеохроизм не обнаружен, в некоторых кристаллах присутствует структура „песочных часов“. Состав вкрапленников клинопироксена отвечает высокоглиноземистому авгиту с повышенным содержанием TiO_2 : $Mg\# = Mg/(Mg + Fe^{2+}) = 0.70—0.76$, Al_2O_3 — до 7.1 мас.%, TiO_2 — 1—2.4 мас.%. Эволюция состава вкрапленников направлена в сторону повышения TiO_2 , Al_2O_3 , FeO и понижения SiO_2 и MgO (табл. 2, рис. 2). В центре вкрапленников встречаются идиоморфные зерна Ti-магнетита и апатита. Клинопироксены основной массы представлены изометричными зернами от 100 до 800 мкм, расположенными в основном между лейстами плагиоклаза. Структура основной массы — офитовая. Клинопироксены основной массы близки по составу к вкрапленникам: TiO_2 — до 2.8 мас.%, Al_2O_3 — до 7 мас.%. Краевые зоны некоторых клинопироксенов замещаются роговой обманкой.

Вкрапленники **плагиоклаза** образуют удлиненные лейсты (до 2 мм) призматического габитуса с полисинтетическим двойникованием и по составу отвечают An_{55-45} . Плагиоклаз основной массы образует мелкие зерна (до 300 мкм) и в отличие от плагиоклазов вкрапленников имеет более кислый состав (An_{35-30}) (табл. 3). Мелкие зерна плагиоклаза часто полностью заключены в клинопироксене (небольшие участки с пойкилоофитовой структурой). Поскольку практически весь плагиоклаз серицитизирован, анализировались только центральные зоны кристаллов.

Редкие вкрапленники **амфибола** образуют зерна размером до 1 мм. По новой классификации ММА [Leake,

Таблица 1. Химический состав (мас.%) габброидов проявления Чирий

Компонент	Chi-0	Chi-2	Chi-D
SiO ₂	41.95	43.51	45.22
TiO ₂	3.28	3.58	2.29
Al ₂ O ₃	13.66	12.61	15.29
Fe ₂ O ₃	8.73	5.75	5.31
FeO	7.18	8.98	5.75
MnO	0.16	0.19	0.16
MgO	5.88	7.22	5.51
CaO	10.84	8.73	10.45
Na ₂ O	2.89	3.13	3.57
K ₂ O	0.92	0.77	0.93
P ₂ O ₅	0.28	0.42	0.36
CO ₂	0.82	0.73	1.36
H ₂ O	3.06	3.77	3.64
F	0.04	0.05	0.04
S	0.03	0.03	0.03
Сумма	99.72	99.46	99.92
<i>Нормативный состав</i>			
Нефелин	2.62	—	2.91
Ортоклаз	5.68	4.80	5.80
Альбит	20.71	27.91	26.48
Анортит	22.54	19.06	24.20
Диопсид	24.83	19.00	22.20
Гиперстен	—	1.77	—
Оливин	3.23	10.48	4.84
Магнетит	13.22	8.79	8.12
Ильменит	6.50	7.17	4.59
Апатит	0.68	1.03	0.88
Сумма	100.00	100.00	100.00

Примечание. Chi-0 и Chi-2 — основное тело проявления, Chi-D — дайка. Петрогенные оксиды — RFA, H₂O и CO₂ — „мокрая“ химия. Нормативный состав (CIPW) рассчитывался по анализам, приведенным к 100 мас.% без учета H₂O, F и S; гиперстен = энстатит + ферросилит, оливин = форстерит + фаялит.

Таблица 2. Химический состав (мас.%) клинопироксенов из габброидов проявления Чирй

Компонент	Вкрапленники										Клинопироксены основной массы				
	Chi-0		Chi-0		Chi-0		Chi-2		Chi-D		Chi-0	Chi-0	Chi-0	Chi-2	Chi-2
	ц	к	ц	к	ц	к	ц	к	ц	к	ц	ц	ц	ц	ц
SiO ₂	47.62	46.84	50.17	48.54	50.01	49.64	51.05	50.74	46.84	46.54	46.30	46.34	46.88	47.55	49.63
TiO ₂	2.08	2.42	1.21	1.75	1.59	1.54	1.03	1.25	2.04	2.40	2.68	2.80	2.58	2.47	1.26
Al ₂ O ₃	5.36	5.97	3.28	5.04	3.67	4.13	3.03	3.41	6.38	7.15	6.93	6.92	6.32	5.08	4.20
FeO _{общ}	9.21	9.21	8.04	8.20	8.49	8.37	8.17	9.54	7.91	8.31	9.22	9.05	9.03	9.28	7.30
MnO	0.14	0.14	0.16	0.11	0.15	0.18	0.22	0.30	0.10	0.13	0.17	0.14	0.14	0.22	0.10
MgO	13.22	12.81	14.45	13.14	14.22	13.50	13.80	12.67	13.30	12.97	12.00	12.53	12.77	12.63	14.49
CaO	21.69	21.62	21.50	22.26	21.16	21.96	21.90	21.68	21.95	21.84	21.72	21.29	21.51	21.63	22.08
Na ₂ O	0.42	0.43	0.44	0.43	0.46	0.51	0.43	0.49	0.43	0.48	0.45	0.60	0.50	0.51	0.41
Сумма	99.74	99.44	99.25	99.48	99.75	99.83	99.63	100.08	98.95	99.82	99.47	99.68	99.72	99.37	99.47
FeO	5.39	5.50	5.57	5.56	6.51	6.01	7.10	8.86	3.93	4.35	6.29	5.38	5.61	6.27	4.38
Fe ₂ O ₃	4.25	4.12	2.75	2.93	2.20	2.63	1.19	0.76	4.43	4.41	3.25	4.08	3.80	3.35	3.25
Сумма	100.16	99.85	99.52	99.77	99.97	100.09	99.75	100.15	99.39	100.26	99.79	100.08	100.10	99.70	99.79

Кристаллохимическая формула рассчитана на 4 катиона и 6 кислорода

Si	1.779	1.757	1.871	1.814	1.861	1.848	1.903	1.897	1.755	1.732	1.741	1.733	1.753	1.789	1.842
Al ^{IV}	0.221	0.243	0.129	0.186	0.139	0.152	0.097	0.103	0.245	0.268	0.259	0.267	0.247	0.211	0.158
Al ^{VI}	0.015	0.021	0.016	0.036	0.022	0.029	0.037	0.047	0.037	0.045	0.048	0.038	0.031	0.014	0.026
Ti	0.058	0.068	0.034	0.049	0.044	0.043	0.029	0.035	0.057	0.067	0.076	0.079	0.073	0.070	0.035
Fe ³⁺	0.119	0.116	0.077	0.083	0.062	0.074	0.033	0.021	0.125	0.123	0.092	0.115	0.107	0.095	0.091
Fe ²⁺	0.168	0.173	0.174	0.174	0.202	0.187	0.221	0.277	0.123	0.135	0.198	0.168	0.176	0.197	0.136
Mn	0.004	0.004	0.005	0.004	0.005	0.006	0.007	0.009	0.003	0.004	0.005	0.004	0.004	0.007	0.003
Mg	0.736	0.716	0.803	0.732	0.788	0.749	0.767	0.706	0.743	0.719	0.673	0.698	0.712	0.708	0.802
Ca	0.868	0.869	0.859	0.891	0.844	0.876	0.875	0.868	0.881	0.871	0.875	0.853	0.862	0.872	0.878
Na	0.030	0.032	0.032	0.031	0.033	0.037	0.031	0.036	0.031	0.035	0.033	0.044	0.036	0.037	0.029
Mg#	0.72	0.71	0.76	0.74	0.75	0.74	0.75	0.70	0.75	0.74	0.70	0.71	0.72	0.71	0.78

Примечание. ц — центр, к — край кристалла; FeO и Fe₂O₃ рассчитаны по стехиометрии; Mg# = Mg/(Mg + Fe_{общ}).

Таблица 3. Химический состав (мас.%) плагиоклазов из габброидов проявления Чирй

Компонент	Вкрапленники					Зерна основной массы						
	Chi-0	Chi-0	Chi-0	Chi-2	Chi-2	Chi-0	Chi-0	Chi-0	Chi-0*	Chi-0*	Chi-0*	Chi-0*
SiO ₂	55.32	55.11	54.38	59.13	54.97	63.13	62.08	62.16	62.85	64.92	65.13	64.93
TiO ₂	0.03	0.07	0.03	0.14	0.02	0.00	0.05	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	27.10	28.26	28.84	22.74	27.24	21.33	21.69	22.26	20.80	18.36	18.34	18.56
FeO	0.36	0.41	0.44	0.23	0.28	0.05	0.10	0.08	0.74	0.05	0.23	0.24
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.02
MgO	0.06	0.05	0.06	0.01	0.03	0.00	0.01	0.01	0.04	0.02	0.01	0.01
CaO	10.68	10.44	10.78	10.09	11.48	6.57	7.78	6.40	0.09	0.04	0.04	0.06
SrO	0.11	0.00	0.00	0.00	0.08	0.01	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O	5.31	5.32	5.06	5.99	5.06	8.36	7.67	8.35	1.97	1.89	1.87	2.10
K ₂ O	0.31	0.29	0.27	1.16	0.30	0.47	0.59	0.15	12.83	14.05	14.09	13.59
Сумма	99.27	99.95	99.86	99.49	99.46	99.92	99.97	99.63	99.37	99.33	99.70	99.51

Кристаллохимическая формула рассчитана на 8 кислорода

Si	2.517	2.487	2.459	2.684	2.501	2.814	2.777	2.779	2.900	2.998	2.999	2.991
Ti	0.001	0.002	0.001	0.005	0.001	0.000	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
Al	1.453	1.503	1.537	1.217	1.461	1.121	1.144	1.173	1.131	1.000	0.995	1.008
Fe ²⁺	0.014	0.015	0.016	0.009	0.011	0.002	0.004	0.003	0.029	0.002	0.009	0.009
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001
Mg	0.004	0.003	0.004	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001	0.003	0.001	0.000	0.001
Ca	0.521	0.505	0.522	0.491	0.560	0.314	0.373	0.307	0.005	0.002	0.002	0.003

Sr	0.003	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.468	0.466	0.444	0.527	0.446	0.723	0.665	0.724	0.176	0.169	0.167	0.188
K	0.018	0.016	0.016	0.067	0.017	0.027	0.034	0.009	0.755	0.828	0.828	0.799
Сумма катионов	4.998	4.999	5.000	5.000	5.000	5.000	4.999	5.000	5.000	5.000	5.000	4.998
<i>Миналы</i>												
An	51.6	51.2	53.2	45.2	54.6	29.5	34.8	29.4	0.5	0.2	0.2	0.3
Ab	46.4	47.2	45.2	48.6	43.5	68.0	62.1	69.4	18.8	16.9	16.8	19.0
Or	2.1	1.7	1.6	6.2	1.9	2.5	3.1	1.3	80.7	82.9	83.1	80.7

Примечание. Все железо в форме FeO; An = CaAl₂Si₂O₈, Ab = NaAlSi₃O₈, Or = KAlSi₃O₈ + SrAl₂Si₂O₈; BaO — не определялся.

* Ксеноморфные зерна калиевого полевого шпата.

1997] состав амфиболов соответствует высокотитанистой роговой обманке (мас.%): SiO₂ — 40—42, Al₂O₃ — 10.3—11.4, TiO₂ — 3.7—4.5; Mg# = Mg/(Mg + Fe) — 0.5—0.6 (ф.е.). Содержание H₂O и F — 0.8 и ~0.5 мас.% соответственно. Эволюция вкрапленников амфибола направлена в сторону понижения SiO₂, MgO и CaO и повышения FeO (табл. 4, рис. 3). Изредка амфибол встречается в виде одиночных кристаллитов в центре клинопироксенов. Составы кристаллитов амфибола характеризуются более низким содержанием SiO₂ (38.0—39.5 мас.%) и высокими содержаниями Al₂O₃ и TiO₂ (12.8—14.8, 5.0—5.7 мас.% соответственно) и более низким содержанием F (0.18—0.26 мас.%) по сравнению с породообразующим амфиболом. В соответствии с классификацией ММА кристаллиты амфибола относятся к керсутитам (Ti > 0.5 ф.е.). Некоторые вкрапленники амфибола содержат кристаллиты апатита.

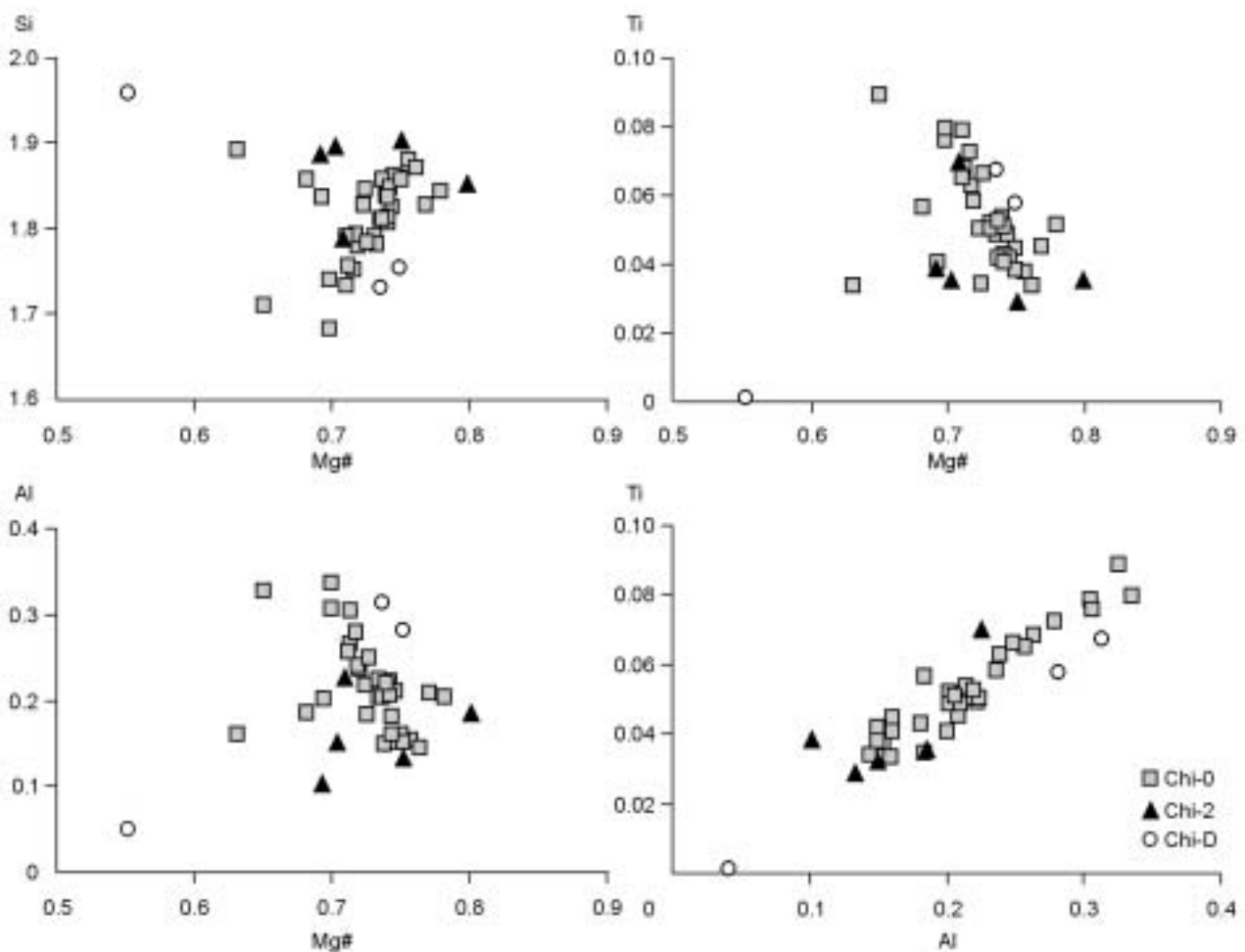


Рис. 2. Вариации состава (ф.е.) клинопироксенов из габброидов проявления Чирий.

Mg# = Mg/(Mg + Fe_{общ}); Al = Al^{IV} + Al^{VI}.

Таблица 4. Химический состав (мас.%) амфиболов из габброидов проявления Чирий

Компонент	Chi-0		Chi-0		Chi-2		Chi-0	Chi-0	Chi-0	Chi-0	Chi-0	Chi-2	Chi-D	Chi-0	Chi-0	Chi-0	
	ц	к	ц	к	ц	к	ц	ц	ц	ц	ц	ц	ц	*	*	*	*
SiO ₂	41.12	40.91	40.70	39.91	40.56	40.88	40.81	41.23	41.34	41.10	41.10	40.12	41.89	38.06	39.31	39.56	38.82
TiO ₂	3.86	3.80	4.58	3.69	4.49	4.43	4.05	4.08	3.74	4.35	4.41	4.21	3.99	5.66	3.17	5.28	5.01
Al ₂ O ₃	10.80	10.34	11.23	10.82	10.70	10.75	11.44	10.68	10.46	11.10	11.05	10.88	10.31	14.23	14.75	13.07	12.76
FeO	14.71	15.70	14.28	15.90	14.83	15.01	13.78	14.01	14.86	14.71	14.49	15.76	15.89	14.62	16.45	15.94	14.22
MnO	0.24	0.25	0.26	0.22	0.29	0.23	0.22	0.27	0.19	0.22	0.21	0.25	0.23	0.19	0.24	0.17	0.20
MgO	11.12	10.76	11.47	10.98	11.28	10.68	11.67	11.18	12.00	11.00	12.14	10.87	11.30	9.74	9.29	9.81	10.86
CaO	11.04	10.98	11.28	10.72	11.14	11.10	11.42	11.10	11.04	10.96	11.22	10.93	10.92	11.40	11.48	11.45	11.69
Na ₂ O	3.97	3.93	3.06	3.09	2.99	3.06	3.17	3.25	3.10	2.98	2.91	2.80	3.20	2.89	3.11	2.93	2.85
K ₂ O	1.35	1.44	0.87	0.91	0.89	0.92	0.90	0.92	0.85	0.85	0.79	0.89	0.90	0.84	0.61	0.59	0.82
F	—	—	0.45	—	—	—	—	—	—	—	—	0.50	—	—	0.26	0.18	0.24
Cl	0.06	0.05	0.06	0.04	0.06	0.03	0.06	0.05	0.05	0.04	0.03	0.04	0.05	0.02	0.05	0.02	0.02
Сумма	98.27	98.17	98.24	96.28	97.23	97.08	97.52	96.77	97.63	97.31	98.35	97.24	98.68	97.65	98.71	99.00	97.49

Кристаллохимическая формула рассчитана на 23 кислорода

Si	6.191	6.203	6.118	6.144	6.151	6.205	6.138	6.250	6.229	6.202	6.134	6.136	6.268	5.750	5.910	5.918	5.882
Al ^{IV}	1.809	1.797	1.882	1.856	1.849	1.795	1.862	1.750	1.771	1.798	1.866	1.864	1.732	2.250	2.090	2.082	2.118
Al ^{VI}	0.108	0.051	0.108	0.107	0.064	0.128	0.166	0.159	0.087	0.176	0.078	0.097	0.087	0.283	0.524	0.223	0.161
Ti	0.437	0.433	0.518	0.427	0.512	0.506	0.458	0.465	0.424	0.494	0.495	0.484	0.449	0.643	0.358	0.594	0.571
Fe	1.852	1.991	1.795	2.047	1.881	1.905	1.733	1.776	1.873	1.856	1.809	2.016	1.989	1.847	2.068	1.994	1.802
Mn	0.031	0.032	0.033	0.029	0.038	0.029	0.029	0.034	0.024	0.028	0.026	0.032	0.029	0.025	0.030	0.021	0.026
Mg	2.495	2.431	2.570	2.519	2.550	2.416	2.616	2.526	2.695	2.474	2.700	2.478	2.520	2.193	2.082	2.187	2.452
Ca	1.781	1.784	1.817	1.768	1.810	1.805	1.840	1.803	1.782	1.772	1.794	1.791	1.751	1.845	1.849	1.835	1.898
Na	0.290	0.289	0.223	0.231	0.220	0.225	0.231	0.239	0.226	0.218	0.211	0.208	0.232	0.212	0.227	0.212	0.209
K	0.065	0.070	0.042	0.045	0.043	0.044	0.043	0.045	0.041	0.041	0.038	0.043	0.043	0.040	0.029	0.028	0.040
Сумма катионов	15.059	15.081	15.106	15.172	15.117	15.058	15.116	15.047	15.151	15.059	15.151	15.149	15.099	15.088	15.168	15.095	15.159
F	—	—	0.214	—	—	—	—	—	—	—	—	0.242	—	—	0.122	0.086	0.113
Cl	0.016	0.014	0.017	0.009	0.016	0.008	0.015	0.013	0.013	0.009	0.007	0.010	0.014	0.006	0.013	0.006	0.006
Mg#	0.57	0.55	0.59	0.55	0.58	0.56	0.60	0.59	0.59	0.57	0.60	0.55	0.56	0.54	0.50	0.52	0.58

Примечание. Mg# = Mg/(Mg + Fe); прочерк — не анализировалось.

* Одиночные кристаллиты амфибола в клинопироксене.

Таблица 5. Химический состав (мас.%) биотитов из габброидов проявления Чирий

Компонент	Chi-0	Chi-0	Chi-0	Chi-0	Chi-0	Chi-2	Chi-2	Chi-2	Chi-2	Chi-2	Chi-2	Chi-D	Chi-D
SiO ₂	36.11	35.06	35.09	35.90	35.65	35.21	34.92	35.50	34.89	35.54	35.75	35.09	34.96
TiO ₂	5.81	5.96	5.86	5.87	5.93	6.37	6.38	6.44	6.56	7.25	6.02	5.38	5.60
Al ₂ O ₃	13.28	14.40	14.21	13.11	13.55	13.54	12.59	12.73	13.22	13.34	13.59	12.56	12.75
FeO	19.07	17.64	16.81	18.31	18.26	19.55	22.67	21.32	20.28	19.51	17.80	25.96	25.46
MnO	0.14	0.14	0.12	0.14	0.13	0.14	0.17	0.19	0.20	0.19	0.14	0.31	0.30
MgO	11.24	11.93	12.61	11.95	12.61	11.71	10.01	10.15	10.41	10.38	11.71	18.31	18.59
CaO	0.03	0.08	0.10	0.08	0.05	0.02	0.05	0.04	0.12	0.07	0.04	0.05	0.04
BaO	—	—	—	—	0.73	0.92	0.01	—	—	0.93	—	—	—
Na ₂ O	0.87	1.00	1.11	1.06	1.16	1.12	0.88	0.90	0.83	0.82	1.15	0.81	0.92
K ₂ O	8.43	8.29	8.20	8.12	8.04	7.99	8.29	8.49	7.90	9.94	8.05	8.49	8.37
F	—	—	—	—	0.52	0.65	0.63	—	—	0.17	—	—	—
Cl	0.03	0.05	0.07	0.06	0.04	0.03	0.06	0.06	0.04	0.05	0.06	0.08	0.05
Сумма	95.00	94.54	94.18	94.60	96.66	97.25	96.67	95.82	94.45	98.18	94.31	97.03	97.04

Кристаллохимическая формула рассчитана на 14 катионов

Si	5.684	5.505	5.508	5.647	5.530	5.485	5.519	5.618	5.547	5.612	5.639	5.564	5.527
Al	2.464	2.665	2.629	2.431	2.477	2.486	2.345	2.374	2.478	2.483	2.527	2.347	2.376
Ti	0.688	0.704	0.692	0.694	0.692	0.746	0.758	0.766	0.784	0.861	0.714	0.642	0.666
Fe	2.510	2.316	2.207	2.409	2.369	2.547	2.996	2.822	2.697	2.576	2.348	3.442	3.367
Mn	0.018	0.018	0.015	0.019	0.017	0.018	0.023	0.026	0.027	0.025	0.019	0.042	0.040
Mg	2.637	2.792	2.950	2.801	2.915	2.718	2.358	2.394	2.467	2.443	2.753	1.964	2.024

Ca	0.005	0.014	0.017	0.013	0.008	0.003	0.008	0.006	0.021	0.012	0.006	0.008	0.007
Ba	—	—	—	—	0.044	0.056	0.001	—	—	0.058	—	—	—
Na	0.266	0.303	0.338	0.323	0.349	0.338	0.270	0.277	0.256	0.251	0.352	0.250	0.282
K	1.693	1.661	1.642	1.629	1.591	1.588	1.672	1.714	1.603	1.922	1.620	1.717	1.688
Сумма катионов	15.963	15.978	15.997	15.965	15.992	15.985	15.951	15.997	15.879	16.243	15.978	15.975	15.977
F	—	—	—	—	0.255	0.320	0.317	—	—	0.085	—	—	—
Cl	0.008	0.013	0.019	0.017	0.011	0.009	0.016	0.016	0.010	0.013	0.015	0.020	0.013
Mg#	0.51	0.55	0.57	0.54	0.55	0.52	0.44	0.46	0.48	0.49	0.54	0.36	0.38

Примечание. Mg# = Mg/(Mg + Fe); 14 катионов = 8 катионов в тетраэдрической + 6 катионов в октаэдрической позиции.

Магнетит представлен идиоморфными зернами (до 150 мкм) в основной массе, который практически весь замещен гематитом, по этой причине его состав не анализировался. В редких случаях неизменный Ti-магнетит (TiO₂ до 19.5 мас.%) встречается в виде кристаллитов во вкраплениях клинопироксена.

Слюда образует крупные лейсты, а также реакционные каймы вокруг магнетита. Состав слюды заметно варьирует: для нее характерны относительно низкая магнезиальность (Mg# — 0.36—0.57) и низкие концентрации Al₂O₃ (~13 мас.%), K₂O (до 8.5 мас.%), F (0.2—0.65 мас.%) на фоне относительно высоких TiO₂ (до 7 мас.%), BaO (до 1 мас.%), Na₂O (до 1.1 мас.%) и H₂O (~2 мас.%) (табл. 5, рис. 4). Состав слюды соответствует магнезиальному биотиту. Содержания Rb₂O и Li₂O не превышают 0.01 мас.%. Биотиты из главного тела проявления содержат более высокие концентрации TiO₂ по сравнению с биотитами из дайки.

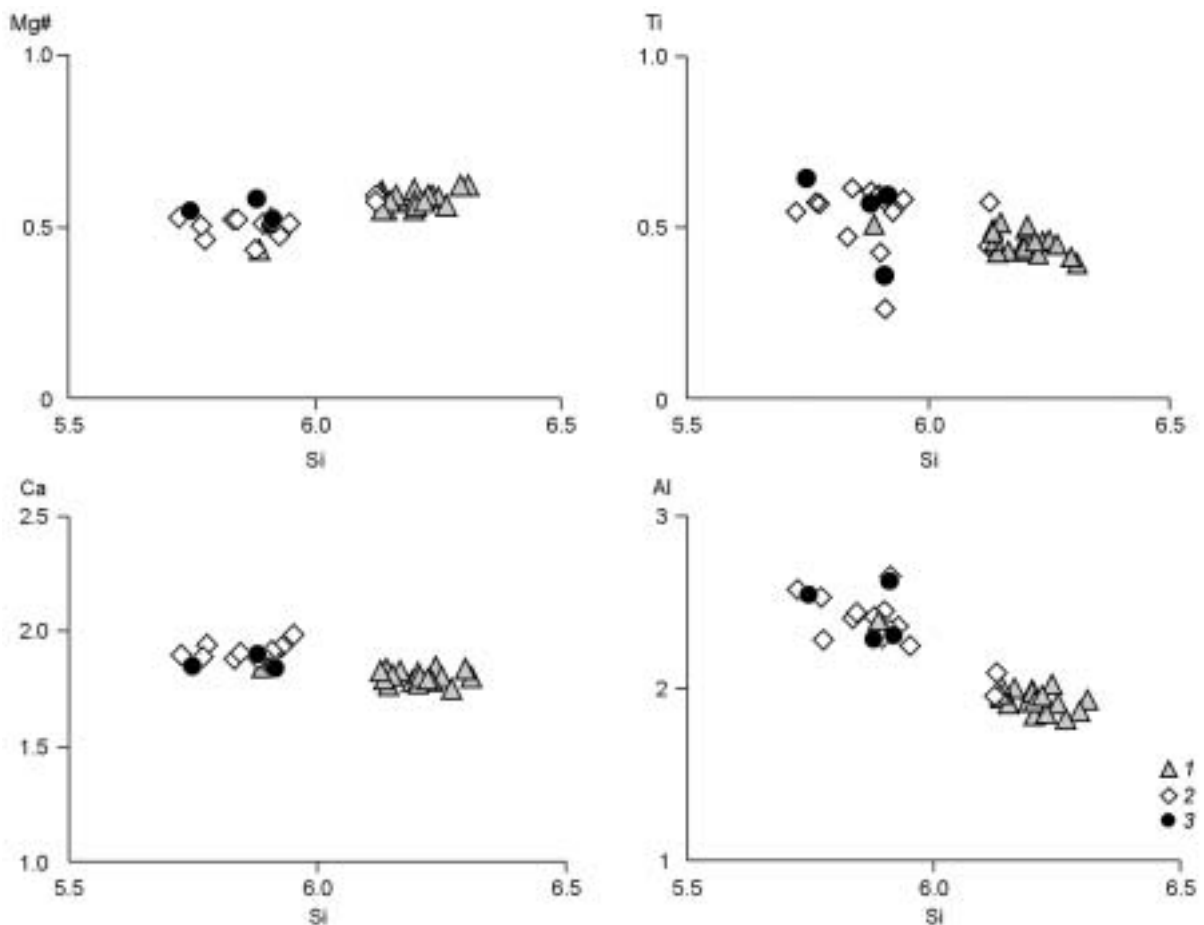


Рис. 3. Вариации состава (ф.е.) амфиболов из габброидов проявления Чирий.

1 — амфибол породы, 2 — дочерние амфиболы из расплавных включений, 3 — кристаллиты амфибола в клинопироксене; Mg# = Mg/(Mg + Fe); Al = Al^{IV} + Al^{VI}.

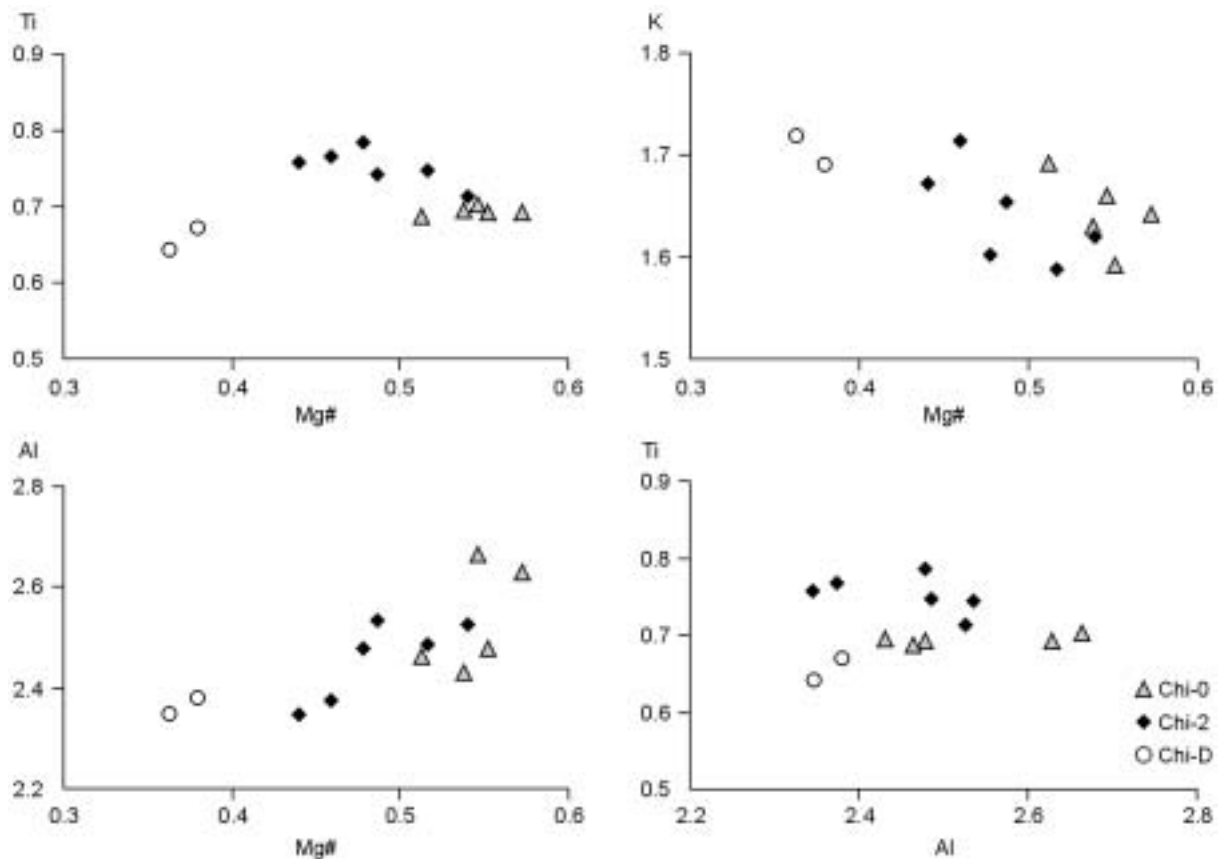


Рис. 4. Вариации состава (ф.е.) биотитов из габброидов проявления Чирий.

$Mg\# = Mg/(Mg + Fe)$; $Al = Al^{IV} + Al^{VI}$.

Таблица 6. Химический состав (мас.%) апатитов из габброидов проявления Чирий

Компонент	Chi-0		Chi-0
	ц	к	ц
SiO ₂	0.38	0.25	0.25
SO ₃	0.00	0.00	0.00
P ₂ O ₅	42.00	41.76	42.30
FeO	0.66	0.71	0.85
MnO	0.07	0.06	0.06
MgO	0.26	0.07	0.21
CaO	54.75	54.45	54.77
La ₂ O ₃	0.03	0.31	0.04
Ce ₂ O ₃	0.30	1.27	0.22
Nd ₂ O ₃	0.17	0.10	0.10
SrO	0.30	0.16	0.32
Na ₂ O	0.04	0.12	0.05
F	1.29	1.20	1.28
Cl	0.18	0.16	0.16
Сумма	100.42	100.60	100.60
O = (F,Cl) ₂	0.58	0.54	0.58
Сумма	99.84	100.06	100.03

Апатит образует удлиненные кристаллы размером до 300 мкм. Состав его отдельных зерен практически постоянен и характеризуется невысокими содержаниями SiO₂, SrO и Cl (до 0.4 мас.%), MgO (до 0.3 мас.%) и обогащением REE₂O₃ (до 1.7 мас.%) и FeO (до 0.9 мас.%). Сумма оксидов, близкая к 100 мас.%, умеренные концентрации фтора (до 1.3 мас.%) и отсутствие SO₃ свидетельствуют о том, что минерал относится к оксифторапатиту (табл. 6).

Интерстиции между породообразующими минералами заполнены в основном кальцитом, палагонитом, хлоритом, также встречаются ксеноморфные зерна калиевого полевого шпата.

С нашей точки зрения, по минеральному и химическому составу пород, а также по структуре основной массы (офитовая, пойкилоофитовая), породы Чирия следует относить к габбро-долеритам. Согласно петрографическим данным, возможный порядок начала кристаллизации минералов был следующим: клинопироксен, плагиоклаз, магнетит → амфибол, апатит → биотит.

МАГМАТИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В МИНЕРАЛАХ ГАББРОИДОВ

Включения расплава были обнаружены в клинопироксене и амфиболе. Флюидные и сульфидные включения встречаются очень редко.

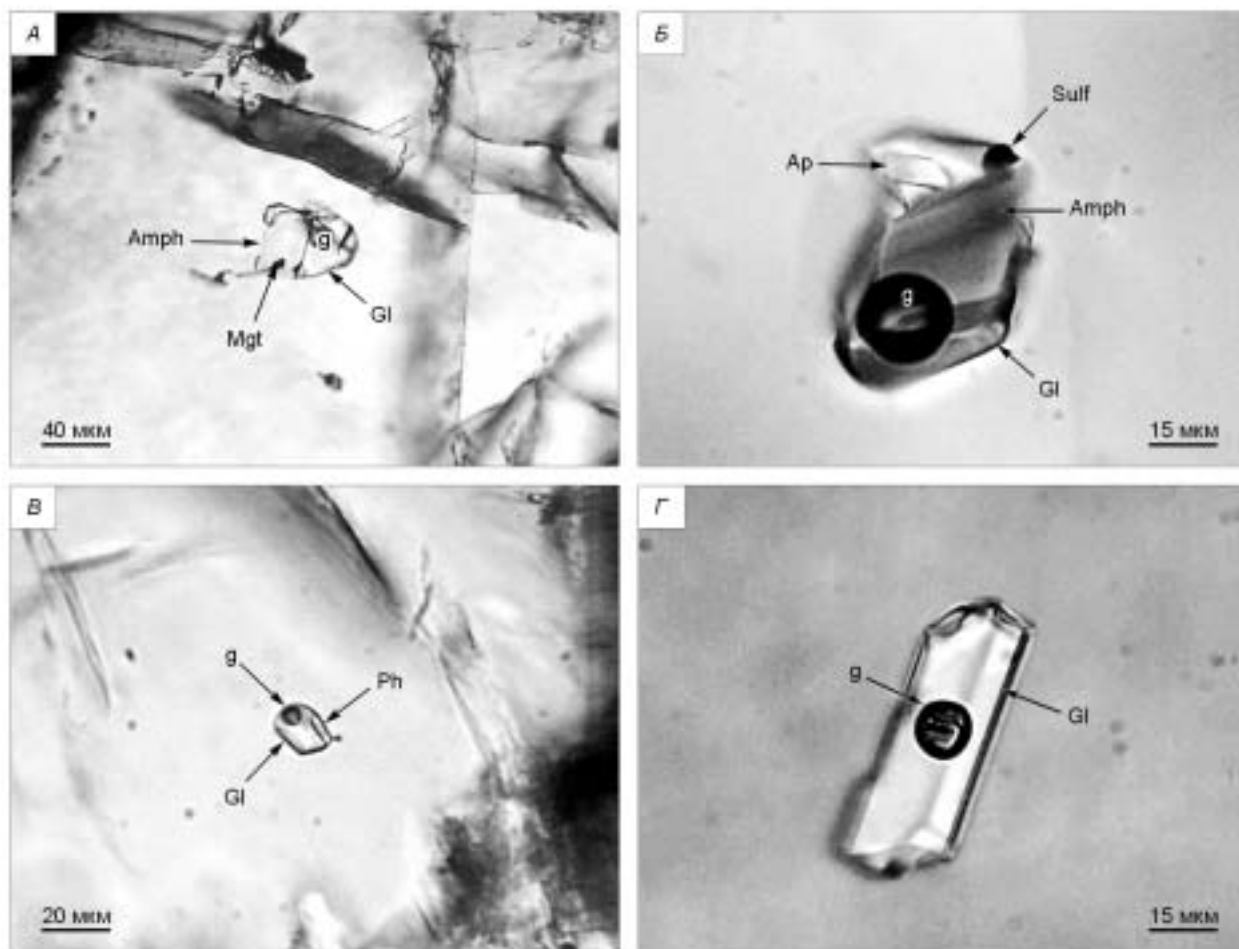


Рис. 5. Расплавные включения в минералах габброидов проявления Чирий.

А — первичное расплавное включение во вкрапленнике клинопироксена. Фазовый состав: стекло + газ + амфибол + магнетит. Проходящий свет, обр. Chi-2.

Б — первичное расплавное включение во вкрапленнике клинопироксена. Фазовый состав: стекло + газ + амфибол + апатит + сульфидная глобула. Проходящий свет, обр. Chi-0.

В — первичное расплавное включение во вкрапленнике амфибола. Фазовый состав: стекло + газ + прозрачная кристаллическая фаза. Проходящий свет, обр. Chi-0.

Г — первичное расплавное включение во вкрапленнике амфибола. Фазовый состав: стекло + газ. Газовый пузырек содержит солевые фазы. Проходящий свет, обр. Chi-0.

g — газовый пузырек, Gl — стекло, Amph — амфибол, Ap — апатит, Mgt — магнетит, Sulf — сульфид, Ph — прозрачная кристаллическая фаза.

В клинопироксене первичные включения расплава располагаются в основном в центре кристаллов. Их размеры варьируют от 10 до 100 мкм. Форма включений: округлая, овальная, изредка полуограненная. Включения расплава в клинопироксене имеют следующий фазовый состав: стекло + малоплотный флюид + дочерние фазы. Иногда присутствует сульфидная глобула. Дочерние фазы представлены амфиболом, реже апатитом и Ti-магнетитом. Взаимоотношение дочерних фаз во включениях свидетельствует о том, что апатит является самой ранней фазой, затем кристаллизовались амфибол и магнетит, и последним образовывалось стекло (рис. 5, *А, Б*).

При нагревании включений первые признаки размягчения стекла появляются при температуре <900 °С, амфибол исчезает при 1050—1070 °С. Температура гомогенизации первичных расплавных включений в клинопироксене составляет 1150—1170 °С. Включения, прогретые „вслепую“ в аргоновой атмосфере в интервале температур 1160—1180 °С, после закалки имеют следующий фазовый состав: стекло + флюид ± Ti-магнетит ± сульфидная глобула.

Вторичные расплавные включения в клинопироксене образуют трассирующие цепочки, приуроченные к залеченным трещинкам. Иногда включения соединяются между собой. Их форма разнообразная: округлая, овальная, каплевидная, неправильная. Размеры включений варьируют от 5 до 40 мкм. Фазовый

Таблица 7.

Химический состав (мас.%) остаточных стекол и дочерних фаз гретых и негретых включений в клинопироксене и амфиболе

Фазовый состав включений	Размер вкл., мкм	Фаза	<i>n</i>	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	H ₂ O	Сумма	<i>T</i> , °C
<i>Негретые включения в клинопироксене</i>																	
Gl+g	20	Gl	1	62.84	0.00	18.97	0.37	0.00	0.03	2.51	4.02	2.91	1.21	0.16	—	93.02	—
»	17	»	2	65.54	0.00	20.92	0.23	0.00	0.02	1.61	3.42	3.07	0.00	0.16	—	94.96	—
Gl+Amph+Apt+g	49	»	1	63.71	0.00	21.35	0.26	0.00	0.03	1.37	3.33	3.15	0.00	0.18	—	93.38	—
		Amph	1	40.70	3.94	11.01	13.70	0.20	11.21	14.75	1.63	0.50	0.00	0.00	—	97.64	—
Gl+Apt+g	21	Gl	3	66.69	0.01	20.46	0.30	0.00	0.03	1.63	4.29	3.02	0.00	0.16	—	96.58	—
Gl+Amph+Mgt+g	18	Mgt	1	0.12	15.05	5.39	71.96	0.44	2.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	95.69	—
		Amph	1	37.14	4.85	12.45	18.43	0.16	8.92	11.63	2.69	0.60	0.00	0.00	—	96.87	—
Gl+Amph+g	22	Gl	1	62.68	0.06	19.20	1.97	0.00	0.09	2.33	2.13	2.58	0.89	0.15	—	92.08	—
		Amph	1	37.86	4.09	13.23	16.31	0.18	9.85	11.41	2.97	0.64	0.00	0.03	—	96.56	—
»	24	Gl	1	63.00	0.00	20.26	0.25	0.00	0.07	2.37	4.38	2.90	0.56	0.17	—	93.95	—
		Amph	1	38.68	2.29	14.73	16.49	0.24	9.36	11.69	2.92	0.59	0.00	0.09	—	97.08	—
»	22	Gl	1	63.52	0.07	21.82	0.23	0.00	0.03	1.26	5.24	3.32	0.00	0.18	—	95.66	—
		Amph	1	38.85	3.75	13.66	16.44	0.27	9.66	11.41	2.98	0.65	0.00	0.03	—	97.70	—
Gl+Apt+g	20	Gl	2	62.82	0.01	20.97	0.20	0.00	0.02	1.62	4.50	3.78	1.21	0.28	—	95.40	—
Gl+Amph+Mgt+g	32	»	1	62.90	0.04	20.17	0.32	0.03	0.10	2.33	4.29	2.81	0.00	0.12	—	93.11	—
		Amph	1	37.35	4.74	14.24	15.53	0.20	9.70	11.58	2.75	0.54	0.00	0.02	—	96.65	—
		Mgt	1	0.11	16.80	5.77	69.52	0.61	1.81	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	—	95.05	—
Gl+g	17	Gl	2	63.79	0.02	20.70	0.33	0.00	0.16	1.62	4.83	3.42	0.00	0.20	—	95.07	—
Gl+Amph+g	26	Amph	1	38.93	5.43	13.81	15.41	0.14	9.39	11.87	2.73	0.63	0.00	0.03	—	98.37	—
»	15	Gl	1	64.56	0.10	20.68	0.36	0.00	0.09	1.67	2.73	2.74	0.00	0.13	—	93.06	—
		Amph	1	39.13	5.27	12.88	16.42	0.17	9.56	11.62	2.78	0.58	0.00	0.01	—	98.43	—
Gl+Amph+Mgt+g	50	Gl	1	65.11	0.00	19.89	0.30	0.00	0.03	1.86	2.60	2.55	0.00	0.15	—	92.48	—
		Amph	1	39.42	5.12	12.66	15.99	0.22	9.37	12.27	2.49	0.57	0.00	0.01	—	98.12	—
Gl+Amph+g	42	Gl	1	67.09	0.00	19.62	0.28	0.00	0.04	1.42	2.30	2.88	0.00	0.13	—	93.75	—
		Amph	1	37.87	4.99	14.05	16.11	0.16	9.24	11.55	2.84	0.56	0.00	0.02	—	97.39	—
Gl+g	15	Gl	2	64.58	0.07	20.81	0.28	0.00	0.10	2.51	3.65	2.41	0.00	0.14	—	94.54	—
»	28	»	1	66.62	0.05	19.53	0.31	0.00	0.07	2.11	2.06	2.16	0.00	0.11	—	93.02	—
Gl+Amph+g	47	»	1	65.35	0.05	21.79	0.22	0.00	0.02	1.38	3.75	2.99	0.00	0.19	—	95.74	—
		Amph	1	38.51	5.28	13.45	17.76	0.21	7.63	11.47	2.82	0.69	0.00	0.03	—	97.85	—

																		+
Gl+g	32	Gl	1	64.82	0.03	21.83	0.24	0.02	0.02	1.12	4.00	3.40	0.00	0.22	—	95.71	—	
»	30	»	2	64.56	0.11	19.40	0.40	0.01	0.20	2.93	1.57	2.50	0.68	0.13	—	92.48	—	
Gl+Amph+Mgt+g	60	»	2	64.95	0.00	20.39	0.23	0.00	0.02	0.54	5.85	3.27	0.02	0.22	1.93	97.41	—	
		Amph	3	40.52	5.09	11.72	14.31	0.26	10.90	11.29	3.46	0.72	0.14	0.04	1.16	99.61	—	
Gl+g	48	Gl	3	64.10	0.01	21.31	0.18	0.00	0.02	0.64	5.74	3.09	0.00	0.27	—	95.36	—	
Gl+Amph+G	26	»	1	64.68	0.07	19.30	0.56	0.00	0.11	1.90	4.02	2.67	0.00	0.15	—	93.46	—	
		Amph	1	38.92	4.75	13.17	16.82	0.25	8.40	11.84	2.93	0.66	0.08	0.04	—	97.85	—	
Gl+Apt+g	14	Gl	1	66.38	0.00	19.93	0.29	0.00	0.05	1.96	4.99	2.56	0.01	0.16	—	96.33	—	
Gl+g	52	»	2	65.30	0.00	20.31	0.25	0.02	0.04	2.04	5.43	2.61	0.01	0.15	—	96.14	—	
»	25	»	1	64.08	0.00	20.50	0.25	0.00	0.06	1.08	5.50	3.39	0.00	0.18	—	95.04	—	
Gl+Amph+g	53	»	1	63.50	0.04	20.63	0.22	0.01	0.01	1.34	5.05	3.07	0.02	0.17	1.44	95.48	—	
		Amph	1	39.30	5.09	13.17	15.31	0.23	9.65	11.84	2.82	0.89	0.09	0.03	1.26	99.68	—	
Gl+g	33	Gl	1	66.24	0.04	18.94	0.24	0.01	0.01	1.72	4.61	3.07	0.03	0.16	—	95.07	—	
Gl+Apt+g	18	»	1	64.83	0.01	19.26	0.21	0.00	0.00	1.85	4.18	2.86	0.01	0.18	—	93.38	—	
Gl+Amph+g	30	»	1	68.20	0.00	18.14	0.22	0.02	0.01	1.39	4.07	2.87	0.02	0.12	—	95.06	—	
Gl+Amph+g+Sulf	31	»	1	63.87	0.04	19.01	0.50	0.01	0.10	1.23	4.48	3.04	0.00	0.14	—	92.42	—	
Gl+Amph+Apt+g+Sulf	80	»	2	64.86	0.04	19.58	0.22	0.04	0.01	1.84	5.34	3.47	0.00	0.12	—	95.51	—	
<i>Негретые включения в амфиболе</i>																		
Gl+g	24	»	2	66.28	0.27	21.28	0.73	0.02	0.04	0.57	7.56	2.00	0.01	0.01	—	98.76	—	
»	5	»	1	63.09	0.11	19.81	1.30	0.02	0.36	0.19	3.61	10.13	0.12	0.31	—	99.05	—	
»	12	»	1	58.97	0.55	17.51	2.59	0.05	0.82	1.75	4.64	8.67	0.08	0.13	—	95.75	—	
»	40	»	2	63.07	0.05	20.61	0.39	0.03	0.01	0.15	5.93	5.23	0.19	0.26	2.89	98.80	—	
»	10	»	1	61.19	0.16	19.97	0.76	0.07	0.08	0.71	5.97	1.65	0.13	0.30	—	90.97	—	
»	8	»	1	62.80	0.12	18.93	0.96	0.03	0.65	1.09	2.04	10.19	0.23	0.15	—	97.19	—	
<i>Гретье включения в клинопироксене</i>																		
»	8	»	1	49.97	2.31	14.17	8.98	—	7.01	11.29	4.31	1.30	0.44	0.06	—	99.84	1160	
Gl+g+Sulf	22	»	1	49.57	2.39	14.58	7.27	—	6.98	10.23	4.46	1.48	0.53	0.09	—	97.57	1160	
Gl+g+Mgt+Sulf	24	»	1	49.82	2.27	14.16	8.56	—	6.23	9.80	4.60	1.66	0.58	0.08	—	97.76	1180	

Примечание. Петрогенные оксиды и Cl — рентгеноспектральный анализ; H₂O — SIMS; n — количество анализов; прочерк — не анализировалось; Gl — стекло, Amph — амфибол, Apt — апатит, Mgt — магнетит; g — газ; Sulf — сульфидная глобула. T — температура прогрева включения.

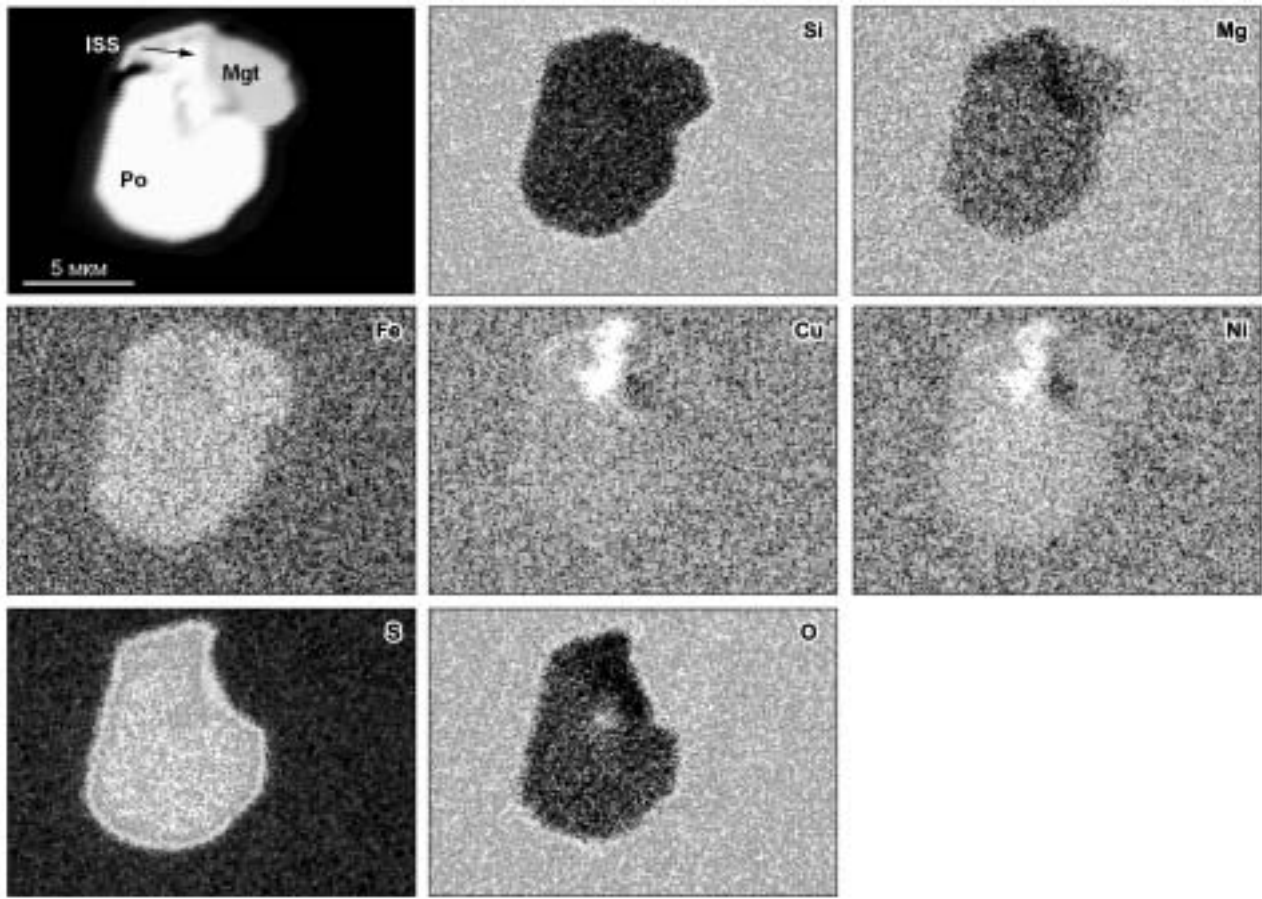


Рис. 6. Карта распределения по элементам для вторичного сульфидного включения в клинопироксене из габброидов проявления Чирий.

Фотография включения сделана во вторичных электронах на сканирующем микроскопе JSM-6380la. Mgt — магнетит, Po — пирротин; ISS — промежуточный твердый раствор. Магнетит содержит незначительные концентрации Ti.

состав вторичных расплавных включений: стекло ± малоплотный флюид ± прозрачные кристаллические фазы. Кроме расплавных включений в клинопироксене также встречаются вторичные сульфидные включения, располагающиеся цепочками. Размеры сульфидных глобул от 5 до 15 мкм.

Во вкрапленниках **амфибола** выявлены *первичные расплавные включения*, располагающиеся в центральных зонах кристаллов. Размеры включений от 5 до 40 мкм, форма — округлая, овальная, иногда вытянутая, полуограненная. Фазовый состав включений: стекло + малоплотный флюид ± прозрачные кристаллические фазы (апатит и др.) (см. рис. 5, B). В редких случаях газовый пузырек содержит солевые фазы (см. рис. 5, Г). При нагревании включений первые признаки размягчения стекла появляются при температуре ~750 °С. Температура гомогенизации первичных расплавных включений в амфиболе составляет 930—950 °С. Помимо расплавных включений в амфиболе изредка встречаются отдельные сульфидные глобулы. Их размеры варьируют от 5 до 20 мкм.

Согласно взаимоотношениям дочерних фаз в расплавных включениях в клинопироксене, порядок их образования был следующим: апатит → Ti-магнетит → амфибол → стекло. Температуры гомогенизации включений фиксируют минимальные температуры кристаллизации минералов и захвата ими расплавных включений. Термометрические данные показывают, что кристаллизация клинопироксена происходила при температуре >1170 °С. Флюидные включения, ассоциирующие вместе с расплавными включениями, практически не встречаются. Криометрические исследования расплавных включений в клинопироксене показали, что газовые пузырьки включений являются малоплотными, т. е. клинопироксен кристаллизовался в приповерхностных условиях.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВКЛЮЧЕНИЙ

Был определен состав прогретых стекол в клинопироксене, а также состав остаточных стекол и некоторых дочерних фаз включений в клинопироксене и амфиболе.

Состав прогретых включений в клинопироксене по сравнению с остаточными стеклами характеризуется повышенными содержаниями (мас.%): FeO — 7.3—9.0, MgO — 6.2—7.0, CaO — 9.8—11.3, TiO₂ — 2.27—2.40 и P₂O₅ — 0.4—0.6 и относительно низкими содержаниями SiO₂ — 49.9—50, Al₂O₃ — 14.2—14.6, Na₂O — 4.3—4.6 и K₂O — 1.3—1.7. По своему составу они наиболее близки к составу габброидов, за исключением концентраций кремнезема и щелочей (табл. 7).

Остаточные стекла включений в клинопироксене по сравнению с составом породы имеют более кислый состав и незначительно варьируют по основным петрогенным компонентам (мас.%): SiO₂ — 62.6—66.5, TiO₂ — 0.01—0.1, Al₂O₃ — 18.0—21.8, FeO — 0.1—1.5, MgO — 0.01—0.20, CaO — 0.5—2.5, Na₂O — 1.5—5.8, K₂O — 2.5—3.5, P₂O₅ — 0.01—0.9, Cl — 0.1—0.3, F ~0.2, H₂O ~1.4. Остаточные стекла включений в амфиболе отличаются от стекол включений в клинопироксене более высокой суммой щелочей (мас.%): SiO₂ — 59.0—66.3, TiO₂ — 0.1—0.6, Al₂O₃ — 17.5—21.3, FeO — 0.4—2.5, MgO — 0.01—0.8, CaO — 0.1—1.8, Na₂O — 2—7.6, K₂O — 2.0—13.2, P₂O₅ — 0.08—0.2, Cl — 0.01—0.3 (см. табл. 7). Стекла включений в амфиболе содержат повышенные концентрации F и H₂O — до 1.9 и 2.9 мас.% соответственно.

Амфибол из включений в клинопироксене существенно отличается по составу от породообразующего амфибола габброидов более низкими содержаниями SiO₂ и F (37.1—39.4 и ~0.04 мас.%) и высокими содержаниями Al₂O₃, TiO₂ и H₂O (12.5—14.7, 3.8—5.4 и 0.8 мас.% соответственно) (см. рис. 3). Дочерний амфибол из расплавных включений по своему составу близок к кристаллитам амфибола в клинопироксене. Согласно классификации MMA [Leake, 1997], амфибол из расплавных включений соответствует керсутиту.

Магнетит включений в клинопироксене обогащен TiO₂ (до 17 мас.%) и по своему составу близок к кристаллитам магнетита в клинопироксене.

Качественная оценка по энергодисперсионным спектрам показала, что **сульфидные глобулы** в амфиболе состоят в основном из пирротина, в редких случаях присутствует халькопирит. Вторичные сульфидные включения в клинопироксене имеют более сложный фазовый состав и состоят из магнетита с очень низкими концентрациями TiO₂ и MgO, пирротина и промежуточного твердого раствора, представленного, по нашему мнению, тонкими сростаниями пентландита и халькопирита (рис. 6).

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГАББРОИДОВ

Распределение редких элементов и редких земель в габброидах проявления Чирий типично для базитов внутриплитного генезиса, в частности для типа OIB (базальты океанических островов), поскольку для них характерны обогащение легкими лантаноидами, максимумы по Nb и Ti, а также отрицательная Pb аномалия (рис. 7). Однако общее обогащение легкими лантаноидами по отношению к тяжелым (La/Yb = 11.9—13.2) ниже среднего (La/Yb = 17) для источников типа OIB.

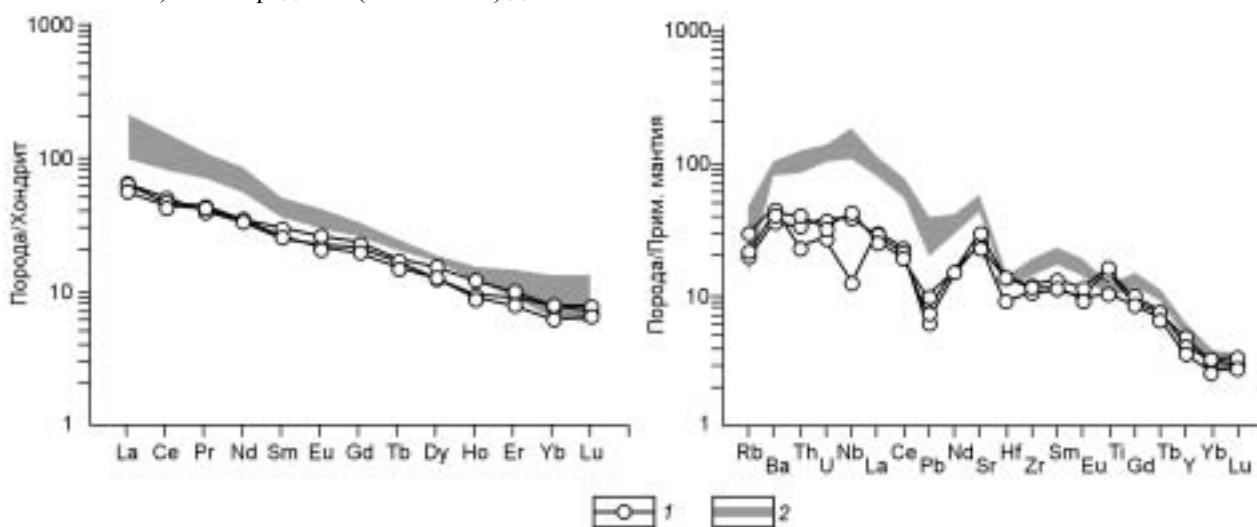


Рис. 7. Распределение редких земель (нормированные по хондриту [Boynnton, 1984]) и редких элементов (нормированные на примитивную мантию [Sun, McDonough, 1989]) в габброидах проявления Чирий.

1 — габброиды Чирия, 2 — трубки взрыва Северо-Минусинской впадины [Литасов и др., 2002].

Таблица 8. Сравнительная характеристика химического (мас.%) и редкоэлементного (г/т) составов габброидов проявления Чирй с трубками взрыва Северо-Минусинской впадины

Компонент	Chi-0	Chi-2	Chi-D	bzh-1	kg-2	tsh-2	OIB*
SiO ₂	41.95	43.51	45.22	43.45	42.96	43.96	50.02
TiO ₂	3.28	3.58	2.29	2.53	2.25	2.45	2.44
Al ₂ O ₃	13.66	12.61	15.29	13.17	12.51	14.22	13.78
Fe ₂ O ₃	8.73	5.75	5.31	13.58	13.38	12.80	—
FeO	7.18	8.98	5.75	—	—	—	10.63
MgO	5.88	7.22	5.51	10.25	12.64	8.54	7.47
MnO	0.16	0.19	0.16	0.18	0.18	0.17	0.16
CaO	10.84	8.73	10.45	9.71	10.23	10.05	10.84
Na ₂ O	2.89	3.13	3.57	3.33	2.60	3.50	2.45
K ₂ O	0.92	0.77	0.93	1.20	1.52	1.38	0.62
P ₂ O ₅	0.28	0.42	0.36	0.97	0.79	0.77	0.33
CO ₂	0.82	0.73	1.36	—	—	—	0.04
H ₂ O	3.06	3.77	3.64	—	—	—	0.49
F	0.04	0.05	0.04	—	—	—	0.08
S	0.03	0.03	0.03	—	—	—	0.09
Сумма	99.72	99.46	99.92	99.94	99.99	99.90	99.44
Cr	30	—	—	267	480	170	537
V	554	398.1	222.9	150	179	169	234
Co	56.2	42.0	32.3	48.2	55.2	47.1	—
Zn	104	—	—	113	104	113	—
Cu	439	61.9	145	58.4	70.6	67.1	—
Mo	1.5	1.5	0.8	6.0	5.4	5.6	—
W	0.2	0.9	0.9	—	—	—	—
Sc	40.4	20.7	20.8	15.7	22.3	18.8	34.1
Ga	23.0	18.2	16.6	18.3	17.4	19.8	—
Ge	1.4	1.3	0.9	—	—	—	—
Zr	119	135	132	196	208	207	97.8
Hf	2.9	4.35	4.3	4.2	4.3	4.5	3.78
Nb	9.0	27.7	30.3	103	117	94.8	19.8
Y	22.6	19.3	16.8	21.7	25.1	23.9	18
Ba	317	252	287	632	563	559	0.46
Sr	534	492	630	1142	944	1170	320
Rb	19.2	12.7	13.9	26.2	24.8	23.5	14.4
Cs	1.2	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5	0.46
Th	2.0	2.8	3.5	7.0	7.2	6.8	0.63
U	0.5	0.7	0.6	1.7	1.7	1.7	—
Pb	1.2	1.4	2.0	4.3	3.8	4.5	—
La	20.5	20.1	17.7	59.2	55.6	51.1	11
Ce	41.5	38.2	35.0	110	102	95.5	30.9
Pr	4.9	5.4	5.3	12.6	11.5	11.1	—
Nd	20.2	21.3	20.6	48.1	43.6	42.8	16.1
Sm	4.9	5.9	5.1	9.3	8.4	8.5	3.86
Eu	1.7	2.0	1.6	2.9	2.7	2.7	1.48
Gd	5.5	6.0	5.2	8.0	7.4	7.6	7.3
Tb	0.8	0.8	0.7	1.1	1.0	1.0	—
Dy	4.1	5.1	4.2	4.8	5.1	5.0	3.81
Ho	0.7	0.9	0.7	0.8	0.9	0.9	—
Er	2.0	2.2	1.7	1.9	2.3	2.1	2.22
Tm	0.3	0.3	0.2	—	—	—	—
Yb	1.6	1.7	1.3	1.3	1.7	1.6	1.87
Lu	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	1.07

Примечание. Петрогенные оксиды — РФА, редкие элементы — ICP-MS; bzh-1 — базанит из тр. Бараджувльская (п.п.п. — 1.57 мас.%), kg-2 — базанит из тр. Конгаровская (п.п.п. — 0.93 мас.%), tsh-2 — базанит из тр. Тергешская (п.п.п. — 2.06 мас.%); п.п.п. включены в сумму. OIB* — средний состав базальтов океанических островов [Kerrick, Wyman, 1997].

Таблица 9. Редкоэлементный состав (г/т) стекол включений и минералов габброидов

Компонент	Chi-2	Chi-0	Chi-0	Chi-2	Chi-2	Chi-0	Chi-0
	Cpx	Cpx	Amph	Amph*	Bt	Gl ^a	Gl ^b
SiO ₂	51.05	46.30	40.70	40.67	35.54	63.50	63.44
TiO ₂	1.03	2.68	4.58	4.01	7.25	0.04	0.02
Al ₂ O ₃	3.03	6.93	11.23	11.59	13.34	20.63	20.73
FeO	8.17	9.22	14.28	12.99	19.51	0.22	0.40
MnO	0.22	0.17	0.26	0.21	0.19	0.01	0.03
MgO	13.80	12.00	11.47	11.83	10.38	0.01	0.01
CaO	21.90	21.72	11.28	11.20	0.07	1.34	0.15
BaO	—	—	0.07	0.06	0.93	0.09	—
Na ₂ O	0.43	0.45	3.06	3.62	0.82	5.05	7.21
K ₂ O	0.00	0.00	0.87	0.73	9.94	3.07	3.52
P ₂ O ₅	0.01	0.00	0.02	0.23	0.01	0.02	0.21
F	—	—	0.45	0.04	0.17	0.19	1.91
Cl	0.00	0.00	0.06	0.03	0.05	0.17	0.28
H ₂ O	—	—	0.80	1.16	1.94	1.44	2.89
Сумма	99.65	99.48	99.13	98.37	100.12	95.76	100.80
Be	—	—	1.05	0.91	0.22	0.94	2.13
Li	—	—	2.67	5.81	28.8	27.6	11.5
B	—	—	0.77	18.6	0.43	41.9	3.57
Cr	139	132	98.4	89.9	100	12.3	—
V	231	266	281	266	288	65.8	—
Rb	10.5	9.4	16.7	18.9	218	58.8	—
Ba	0.37	11.06	599	638	8345	819	—
Th	0.03	0.14	0.24	0.41	0.13	4.6	—
U	0.04	0.02	0.04	0.12	—	1.81	—
Nb	0.39	2.42	192	163	106	17.1	—
La	4.4	5.62	48.5	32.5	4.78	8.8	—
Ce	16.4	19.4	153	91.2	0.27	13	—
Nd	18.8	21.5	124	69.4	2.66	4.4	—
Sr	75.9	97.3	271	702	15.8	472	—
Hf	3.06	4.11	17.3	10.6	2.33	2.6	—
Zr	57.8	81.5	459	306	33.7	152	—
Sm	7.09	7.6	35.5	18.2	0.68	1.19	—
Eu	2.16	2.3	7.81	6.14	4.15	0.64	—
Ti	1.4	1.8	4.6	5.1	7.3	0.37	—
Gd	7.8	8.0	38.4	18.2	0.27	0.59	—
Dy	6.03	6.88	32.3	13.5	1.0	1.27	—
Er	2.78	3.23	16.9	7.12	0.63	0.5	—
Y	26.1	28.5	146	65.6	0.39	5.7	—
Yb	2.31	2.26	12.4	5.17	0.22	0.6	—

Примечание. Петрогенные оксиды (мас.%) — рентгеноспектральный анализ; редкие элементы (г/т), H₂O и F (мас.%) — SIMS. Cpx — клинопироксен; Amph — амфибол; Amph* — дочерний амфибол из расплавногo включения в клинопироксене; Bt — биотит; Gl^a — остаточное стекло из расплавногo включения в клинопироксене; Gl^b — остаточное стекло из расплавногo включения в амфиболе.

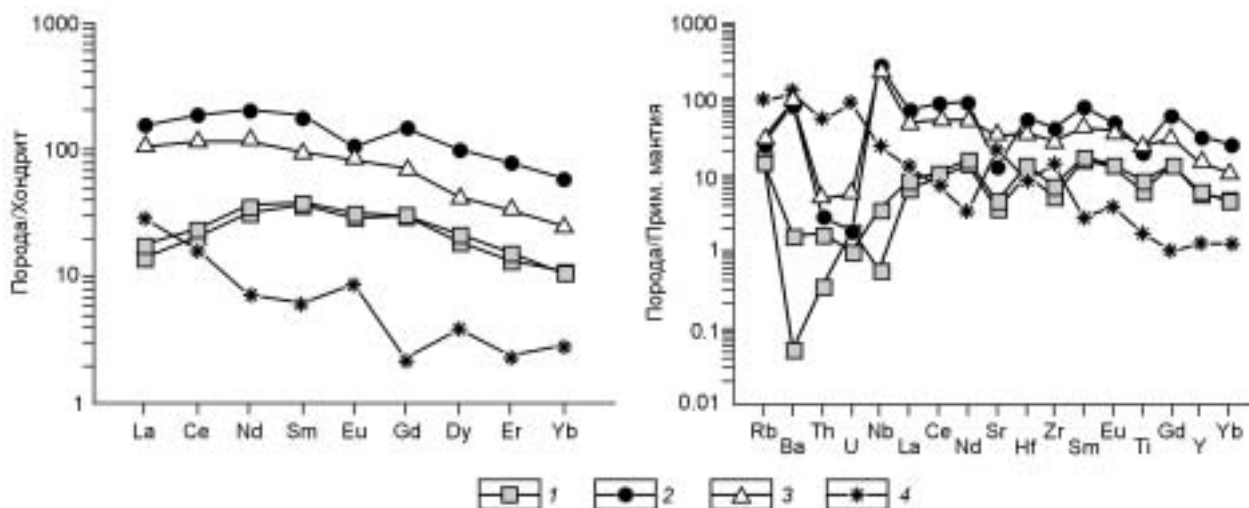


Рис. 8. Распределение редких земель (нормированные по хондриту [Boynnton, 1984]) и редких элементов (нормированные на примитивную мантию [Sun, McDonough, 1989]) в минералах габброидов.

1 — клинопироксен породы; 2 — амфибол породы; 3 — дочерний амфибол из расплавного включения в клинопироксене; 4 — остаточное стекло из расплавного включения в клинопироксене.

По основным петрогенным компонентам состав габброидов проявления Чирий также наиболее приближен к среднему составу OIB: TiO_2 — 2.3—3.6, P_2O_5 — 0.28—0.42 мас.%, однако при этом для габброидов характерно повышенное содержание щелочей и Al_2O_3 и пониженное содержание SiO_2 и MgO (табл. 8).

Таблица 10. Составы рассчитанных равновесных расплавов при 1160 °C

Компонент	1	2	3	Среднее по трем
SiO_2	49.90 0.18	51.00 -0.15	51.20 -0.20	50.70 ± 1.74
TiO_2	2.76 -0.44	2.91 -0.46	2.46 -0.14	2.71 ± 0.58
Al_2O_3	14.99 -0.79	15.62 -0.66	15.27 -0.77	15.29 ± 0.78
FeO	9.53 -0.53	7.73 -0.27	8.65 0.11	8.64 ± 2.23
MgO	5.44 1.59	5.27 1.89	5.18 1.2	5.30 ± 0.33
CaO	10.43 0.88	9.91 0.58	9.81 0.22	10.05 ± 0.82
Na_2O	4.88 -0.56	5.13 -0.56	4.99 -0.28	5.00 ± 0.31
K_2O	1.54 -0.24	1.79 -0.27	1.80 -0.10	1.71 ± 0.36
P_2O_5	0.53 -0.09	0.65 -0.11	0.63 -0.03	0.60 ± 0.16
Сумма	100.00	100.00	100.00	—

Примечание. Для среднего приведен 95%-й доверительный интервал; стекла прогретых включений в клинопироксене: 1, 2 — при 1160 °C, 3 — при 1180 °C. Над чертой — составы рассчитанных равновесных расплавов; под чертой — разница между микрозондовыми анализами и рассчитанными равновесными составами расплавленных включений.

На спайдер-диаграмме для обр. Chi-0 проявляется слабая отрицательная аномалия по Nb. С одной стороны, такая особенность характерна для магм, генерирующихся над зонами субдукции. Для базитового расплава, из которого кристаллизовались габброиды, характерны повышенные содержания фтора, что фиксируется как по валовому составу пород, так и по составу биотитов, апатитов и амфиболов. Такие особенности состава летучих характерны для внутриплитного магматизма [Зоненшайн и др., 1990; Ярмолюк и др., 2000]. Появление базитовой магмы, несущей субдукционные геохимические характеристики, в обстановке внутриконтинентального рифтинга могло быть связано с плавлением литосферной мантии, находившейся над зоной субдукции в раннем палеозое [Лавренчук, 2003]. С другой стороны, ниобиевый минимум может объясняться контаминацией базитового расплава коровым материалом, поскольку средний состав континентальной коры имеет Ta-Nb минимум [Rudnick, 1995]. Однако наиболее вероятной причиной отрицательной ниобиевой аномалии может являться неравномерное распределение фракционирующих минеральных фаз в образце, в частности титаномагнетита. Концентрации редких элементов в минералах габброидов проявления Чирий представлены в табл. 9. Клинопироксены габброидов Чирий имеют спектры распределения редких земель, близкие к примитивным с небольшой степенью обеднения LREE по сравнению с HREE (рис. 8). Поскольку клинопироксен

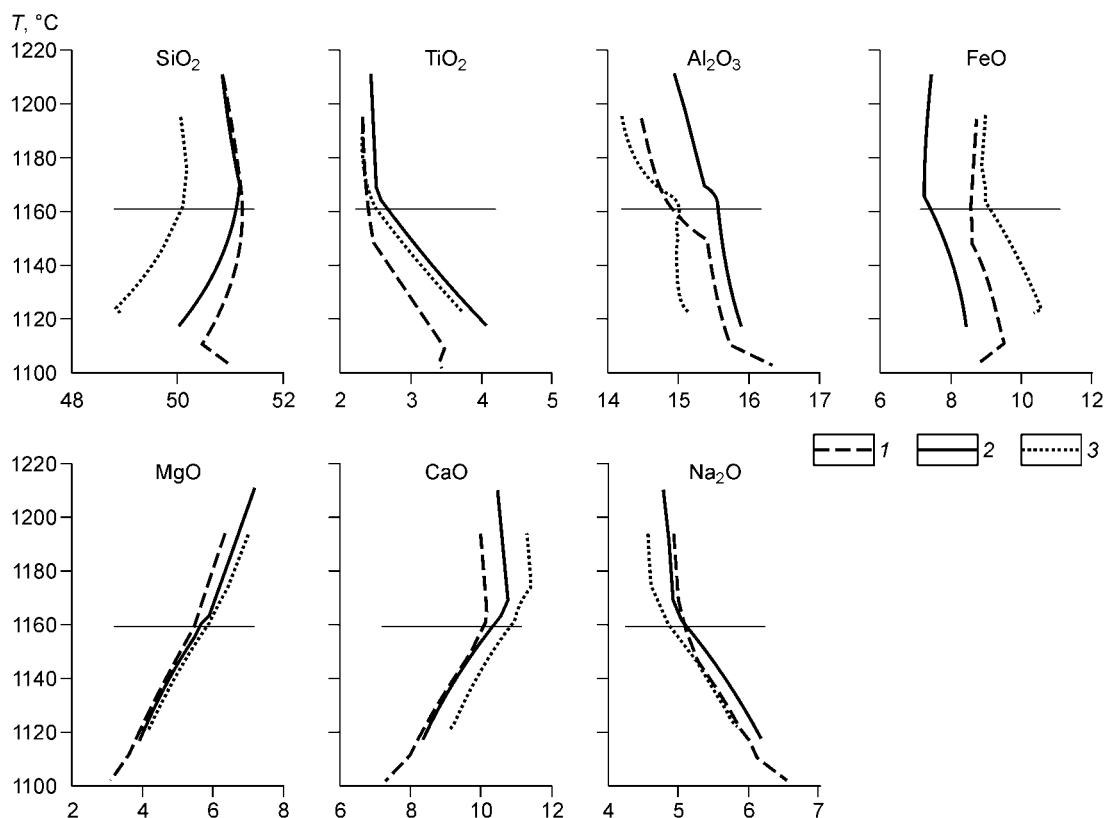


Рис. 9. Рассчитанные траектории эволюции расплава габброидов проявления Чирий.

Стекла прогретых включений в клинопироксене: 1 — при 1160 °С, 2, 3 — при 1180 °С. Петрогенные оксиды приведены в мас. %.

является одним из основных породообразующих минералов, то на спайдер-диаграмме валового состава пород проявляется выполаживание в области легких лантаноидов.

Следует отметить, что габброиды Чирий и базаниты из верхнемеловых трубок взрыва этого региона, к которым было принято относить породы проявления, имеют подобные распределения редких элементов и редких земель, т. е. по генезису первичных расплавов габброиды и базаниты были образованы из одного класса магм — внутриплитного щелочно-базальтоидного.

Однако при однотипном распределении наблюдаются разные уровни концентраций: базаниты трубок взрыва имеют более фракционированные редкоземельные и редкоэлементные спектры. Для них характерно обогащение крупноионными литофильными элементами, легкими лантаноидами и Sr, вызванное метасоматозом (воздействие карбонатитового флюида/расплава) [Мальковец, 2001]. Пониженные концентрации редких элементов и редких земель в габброидах проявления Чирий могут быть следствием того, что эти породы образовались при более высокой степени плавления.

ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение состава прогретых и остаточных стекол включений в минералах позволяет проследить эволюцию расплава в процессе кристаллизации. Мы исходим из тех позиций, что состав стекол включений, прогретых до температур гомогенизации, достаточно близок к составу расплава в момент захвата их минералом-хозяином, а остаточные стекла непрогретых включений представляют собой его производные. Однако следует отметить, что прогрев большинства расплавных включений в клинопироксене, использованных в дальнейшем для микронзондового анализа, проводился „вслепую“ до температур 1160—1180 °С, погрешность замера температуры составляет ± 10 °С. Поэтому существует опасность перегрева включений, приводящая к диффузии между стенками включения и минералом-хозяином и даже его частичному расплавлению. Для оценки степени перегрева включений и захвата матрицы составы гомогенизированных включений сравнивались с термодинамическими расчетами равновесной кристаллизации. Для моделирования использовался состав стекол гомогенизированных включений в клинопироксене, поскольку состав таких включений достаточно близок к таковому равновесного расплава. Мы

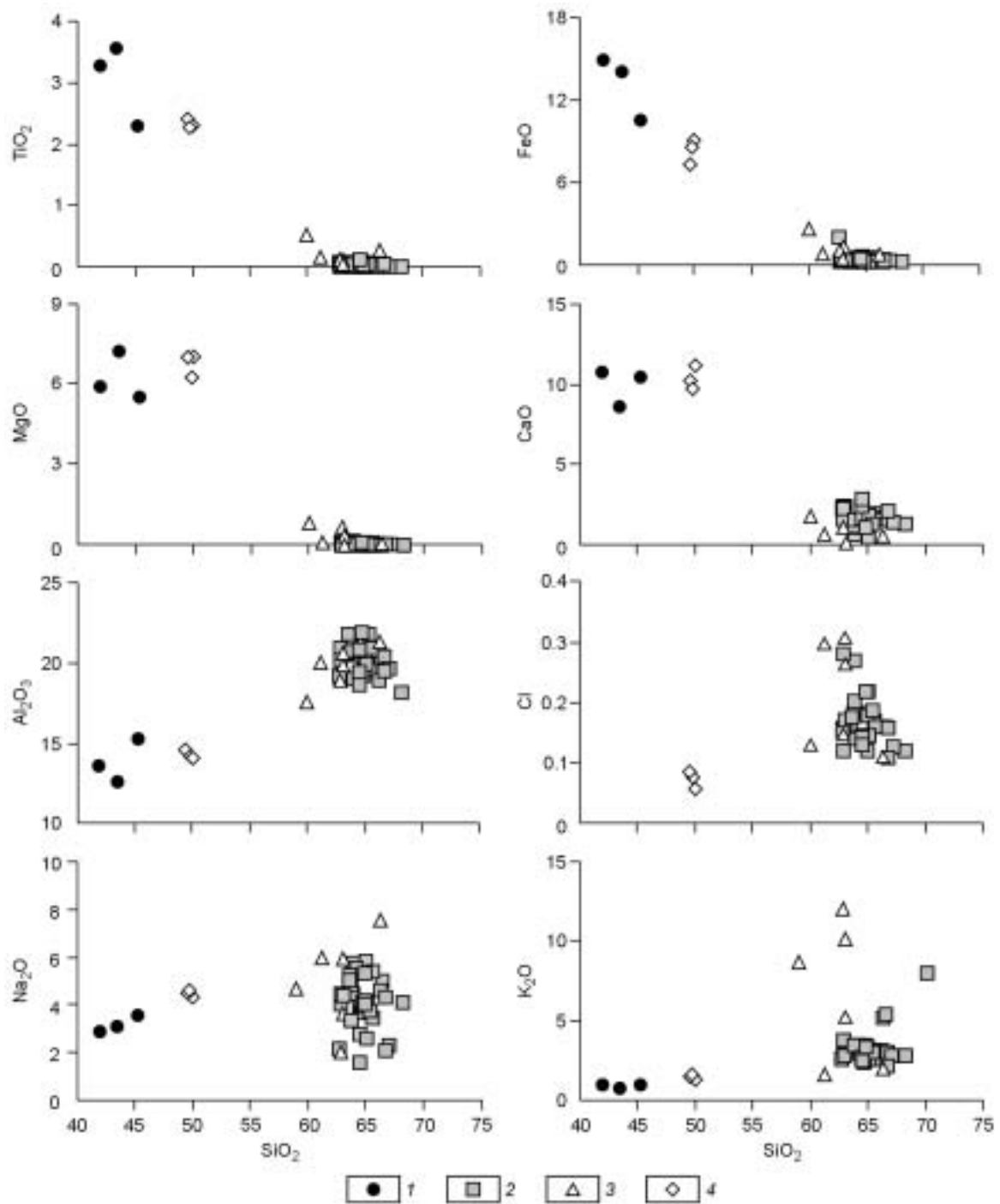


Рис. 10. Вариации состава (мас.%) стекол включений в минералах в сопоставлении с габброидами проявления Чирый.

1 — габброиды, 2 — остаточные стекла включений в клинопироксене, 3 — остаточные стекла включений в амфиболе, 4 — стекла прогретых включений в клинопироксене.

исходили из предположения, что состав гомогенизированного включения, который мы определяем, может быть суммой расплава и минерала-хозяина. Первой ликвидусной фазой при модельных расчетах во всех трех случаях является клинопироксен. Критерий, используемый при термодинамических расчетах, — плагиоклаз, он присутствует во вкрапленниках, т.е. находится в равновесии с расплавом. По первому появлению плагиоклаза фиксируется температура равновесной кристаллизации. Она рассчитанна с

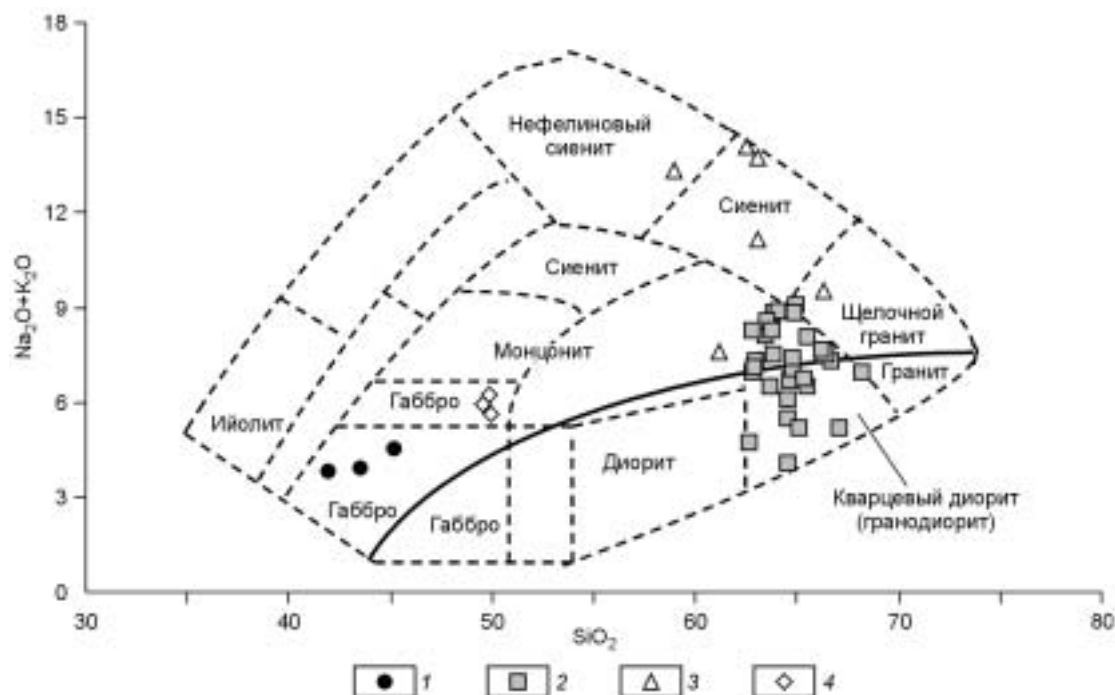


Рис. 11. Диаграмма $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{—SiO}_2$ (мас.%) по [Wilson, 1989].

1 — габброиды проявления Чирий; 2, 3 — остаточные стекла включений: 2 — в клинопироксене, 3 — в амфиболе; 4 — прогретые стекла включений в клинопироксене. Жирная линия отделяет поля щелочных и субщелочных пород.

помощью программы PLUTON [Лавренчук, 2004] и составляет 1160°C , что хорошо согласуется с температурами, полученными при гомогенизации включений.

Составы равновесных расплавов при данной температуре приведены в табл. 10. Наиболее значимые различия между составами расплавных включений и их рассчитанными равновесными составами наблюдаются по MgO , CaO и Al_2O_3 . Клинопироксен (минерал-хозяин) содержит больше Mg и Ca и меньше Ti , Al , P и щелочей, чем равновесный расплав. По соотношению петрогенных оксидов видно, что разница между микронзондовым анализом и рассчитанным равновесным составами идентична клинопироксену (см. табл. 10). Таким образом, предполагаемое количество избыточного клинопироксена в составе прогретых включений не превышает 5—7%. Эволюция состава расплава для рассчитанных траекторий кристаллизации показана на рис. 9.

На графиках вариаций состава прогретых и остаточных стекол включений в сопоставлении с габброидами проявления Чирий (как вероятный исходный расплав) видно, что в процессе кристаллизации происходило накопление SiO_2 , Al_2O_3 , щелочей и Cl и снижение фермических компонентов (рис. 10). Эволюция исходного расплава в ряду порода → прогретые стекла включений → остаточные стекла включений была направлена в сторону гранодиоритовых составов (рис. 11). В процессе эволюции от силикатного расплава в небольшом объеме отделился сульфидный расплав.

Таблица 11. Сравнительная характеристика минерального состава базанитов трубок взрыва Северо-Минусинской впадины и габброидов проявления Чирий

Проявление Чирий	Трубки взрыва*
Вкрапленники	
—	Оливин (Fo85-75)
Клинопироксен (Aug)	Клинопироксен (Ti-Aug)
Плагиоклаз (An55-45)	±Плагиоклаз (An80-55)
Амфибол (Ti-Hbl)	—
Основная масса	
—	Оливин (Fo70-65)
Клинопироксен (Aug)	Клинопироксен (Ti-Aug)
Плагиоклаз (An35-30)	Плагиоклаз (An60-40)
Амфибол (Ti-Hbl)	—
Ti-Магнетит	Ti-Магнетит
Апатит	Апатит
Биотит	±Биотит
Калишпат	Калишпат
—	Ильменит
—	±Нефелин
—	Стекло

Примечание. Fo — форстерит, Aug — авгит, An — анортит, Hbl — роговая обманка.

* Минеральный состав базанитов трубок взрыва [Костюк и др., 1977; Головин и др., 2000; Тимина и др., 2006].

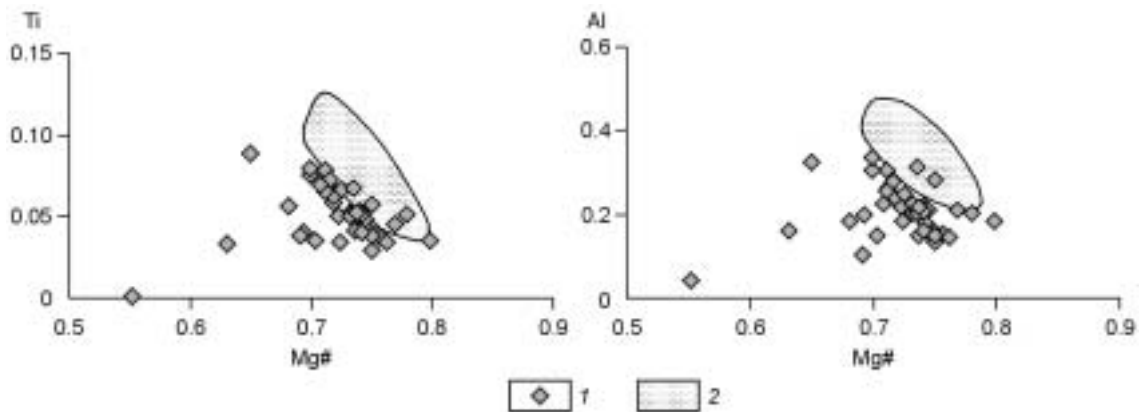


Рис. 12. Сравнительная характеристика клинопироксенов.

1 — клинопироксены габброидов проявления Чирий, 2 — клинопироксены из базанитов трубок взрыва [Костюк и др., 1977; Головин и др., 2000; Тимина и др., 2006]. $Mg\# = Mg/(Mg + Fe)$, $Al = Al^{VI} + Al^{IV}$ и Ti в формульных единицах.

Состав стекол прогретых включений (см. табл. 7) указывает на преобладание натрия над калием, но общая эволюция расплава говорит в пользу постепенного накопления калия. В остаточных стеклах включений в амфиболе содержание K_2O в некоторых случаях достигает 10 мас.%. Кроме того, на поздних этапах кристаллизации появляется биотит и калишпат. Более низкое содержание щелочей в остаточных стеклах включений в клинопироксене может быть обусловлено кристаллизацией в них дочерних фаз (в частности амфибола).

Одним из важнейших вопросов для габброидов данного проявления является выявление физико-химических параметров кристаллизации. Геохимические данные по породам (низкое содержание когерентного Cr (30 г/т) и низкая магнезиальность ($MgO = 5.5—7.2$ мас.%) указывают на то, что габброиды, скорее всего, не являются первоначальными мантийными выплавками. Малоплотные газовые пузырьки включений во вкрапленниках клинопироксена свидетельствуют о том, что кристаллизация клинопироксена и захват включений происходили при температуре >1170 °C в приповерхностных условиях. Присутствие в первичных расплавах включений водосодержащих дочерних фаз (амфибол), а также низкие суммы оксидов микронзондовых анализов в остаточных стеклах включений свидетельствует о том, что исходный базитовый расплав содержал высокие концентрации воды. В процессе эволюции исходного расплава происходило накопление воды: остаточные стекла включений в клинопироксене содержат ~1.4 мас.% воды, а остаточные стекла в амфиболе — уже до 3 мас.%. Следует отметить, что остаточные стекла включений в амфиболе, помимо высоких концентраций щелочей и воды, также насыщены фтором (~2 мас.%). По нашему мнению, постепенное обогащение расплава водой могло привести к автометасоматозу пород Чирия, что подтверждается появлением вторичных минералов в значительном количестве.

Пожалуй, самый главный вопрос, касающийся проявления Чирий, — можно ли данный объект относить к меловым трубкам взрыва данного региона? По минералого-петрографическим и петрохимическим признакам габброиды Чирия существенно отличаются от базанитов трубок взрыва. Породы трубок взрыва относятся к щелочным базальтоидам базанитового типа, в то время как габброиды проявления Чирий относятся к субщелочной серии. Щелочной характер базанитов отражается как в петрохимическом составе (повышенное содержание щелочей), так и в минеральном — появление нефелина в основной массе. Базаниты трубок взрыва по сравнению с габброидами Чирий характеризуются более высокими содержаниями MgO , K_2O , P_2O_5 и более низкими содержаниями TiO_2 (см. табл. 8). Породы проявления Чирий полностью раскристаллизованные, и в отличие от базанитов из меловых трубок взрыва, в которых присутствует свежий оливин как в виде вкрапленников, так и минерала основной массы, габброиды Чирий не содержат оливин (табл. 11). Различия наблюдаются также и в химическом составе минералов. Клинопироксен базанитов трубок взрыва по составу соответствует высокоглиноземистому титан-авгиту (TiO_2 до 5 и Al_2O_3 5—9.7 мас.%), в габброидах проявления Чирий клинопироксен также отвечает по составу авгиту, но с меньшими содержаниями TiO_2 и Al_2O_3 (1.5—2.8 и 3—6.4 мас.% соответственно) (рис. 12). Учитывая петрохимический и минеральный составы, а также структуру габброидов Чирия, можно сделать вывод, что проявление не относится к меловым трубкам взрыва Северо-Минусинской впадины. Однако с геохимической точки зрения, по генезису первичных расплавов и базаниты, и габброиды образовались из одного внутриплитного щелочно-базальтоидного класса магм. Общий характер эволюции в ряду порода → прогретые стекла включений → остаточные стекла включений для базанитов трубок взрыва и для

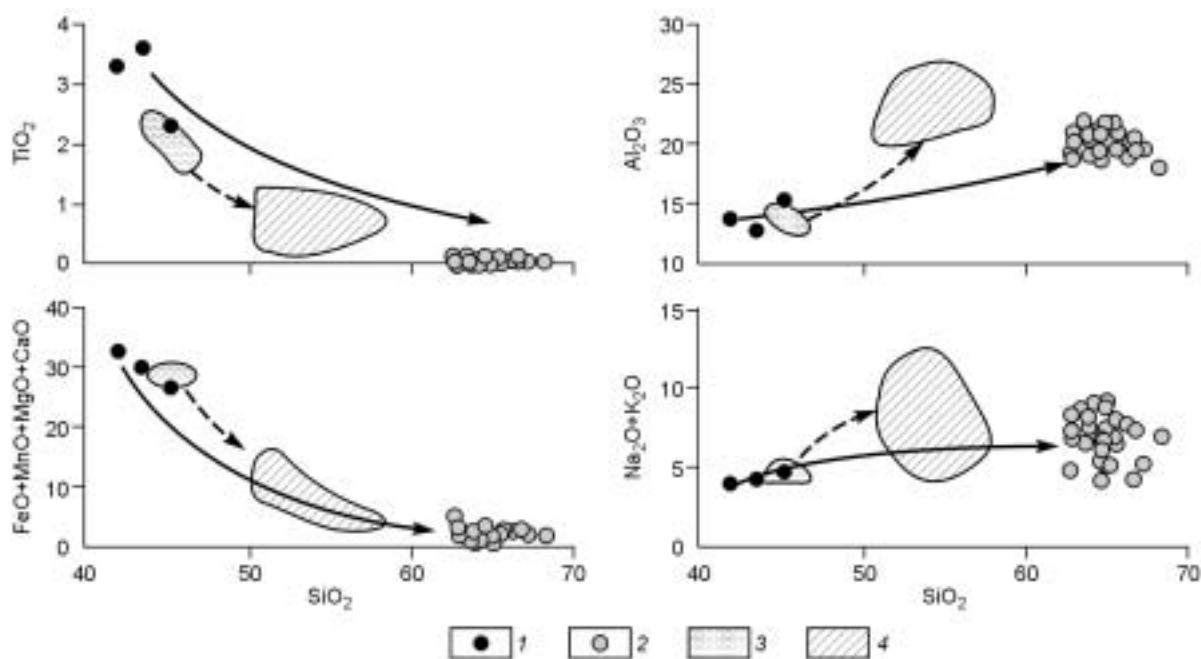


Рис. 13. Сравнительная характеристика эволюции расплава для габброидов проявления Чирий и базанитов трубок взрыва (на примере трубок Тергешская и Беле [Костюк и др., 1977; Головин и др., 2000; Тимина и др., 2006]).

1 — габброиды Чирий, 2 — остаточные стекла включений в клинопироксене из габброидов, 3 — базаниты трубок, 4 — остаточные стекла включений в клинопироксене из базанитов. Стрелками показаны направления эволюции.

габброидов проявления Чирий подобен, но при этом исходный расплав габброидов проявления Чирий претерпел более длительную эволюцию. Вместе с тем для габброидов отмечается понижение фермических компонентов в значительно большей степени по сравнению с базанитами трубок и менее интенсивное накопление глинозема и щелочей (рис. 13).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных данных по габброидам проявления Чирий можно сделать следующие выводы.

1. По минеральному составу и петрографии породы проявления Чирий существенно отличаются от верхнемеловых базанитов трубок взрыва Северо-Минусинской впадины. Породы гипабиссальной интрузии Чирий следует относить к габброидам.

2. Согласно минералого-петрографическим и термометрическим данным, порядок начала кристаллизации минералов габброидов, возможно, был следующим: клинопироксен ($T > 1170$ °C), плагиоклаз, магнетит → амфибол ($T > 950$ °C), апатит, магнетит → биотит, калишпат. Кристаллизация минералов происходила в приповерхностных условиях.

3. В процессе кристаллизации исходного базитового расплава происходило накопление SiO_2 , Al_2O_3 , щелочей и Cl и снижение фермических компонентов. Эволюция исходного расплава в ряду порода → прогретые стекла включений → остаточные стекла включений была направлена в сторону гранодиоритовых составов. По сравнению с базанитами из трубок взрыва исходный расплав габброидов претерпел более длительную эволюцию.

4. Согласно геохимическим данным по генезису первичных расплавов, габброиды проявления и базаниты трубок взрыва были образованы из одного внутриплитного щелочно-базальтоидного класса магм.

Авторы крайне признательны Н.В. Владыкину (Институт геохимии СО РАН, г. Иркутск) за помощь в проведении химических анализов пород, С.Г. Симакину (ИМИ РАН, г. Ярославль) и С.В. Ковязину (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск) за SIMS анализ стекол включений и минералов, Л.Н. Поспеловой (ИГМ СО РАН) за помощь в проведении микрозондовых анализов, А.В. Лавренчуку (ИГМ СО РАН) за консультации, оказанные при моделировании по программе PLUTON, а также Ф.Г. Рейфу (Гелогический институт СО РАН, г. Улан-Удэ) и анонимному рецензенту за конструктивную критику статьи.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 06-05-65015, 04-05-64358) и интеграционного проекта СО РАН № 6.15.

ЛИТЕРАТУРА

Брагин В.Ю., Реутский В.Н., Литасов К.Д., Мальковец В.Г. Позднемеловой эпизод внутриплитного магматизма в Северо-Минусинском прогибе по палеомагнитным и геохронологическим данным // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (4), с. 576—582.

Головин А.В., Шарыгин В.В., Мальковец В.Г. Эволюция расплава в процессе кристаллизации базанитов трубки Беле (Северо-Минусинская впадина) // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (12), с. 1760—1782.

Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. М., Недра, 1990, кн. 1, 327 с.; кн. 2, 334 с.

Костюк В.П., Костюк Е.А., Базарова Т.Ю., Кузнецова И.К., Лаврентьев Ю.Г., Покачалова О.С. Минералогия и природа глубинных включений в базальтах Минусинской котловины // Материалы по генетической минералогии и петрологии. Новосибирск, Наука, 1977, с. 175—191.

Крюков А.В. Строение и состав трубки Бараджульской в Северо-Минусинской впадине // Новые данные по геологии юга Красноярского края. Красноярск, 1963, с. 175—191.

Крюков А.В. Геология Конгаровской трубки взрыва в Северо-Минусинской впадине // Геология и металлогения эффузивно-осадочных формаций Сибири. М., Недра, 1964а, с. 190—202.

Крюков А.В. О новом типе трубок взрыва в юго-западном обрамлении Сибирской платформы // Геология юго-западного обрамления Сибирской платформы. М., Недра, 1964б, с. 196—240.

Крюков А.В. Основные черты алмазности Красноярского края // Материалы по металлогении и полезным ископаемым Красноярского края. Красноярск, Краснояр. кн. изд-во, 1968, с. 155—171.

Лавренчук А.В. Петрология Черносопкинского сиенит-щелочноабброидного комплекса (Восточный Саян): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2003, 20 с.

Лавренчук А.В. Программа для расчета динамики внутрикамерной дифференциации основной магмы „PLUTON“ // Материалы Второй сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле, 1—3 декабря 2004 г. Новосибирск, Изд-во Новосиб. ун-та, 2004, с. 105—106.

Литасов Ю.Д., Мальковец В.Г., Литасов К.Д., Агашев А.М., Орихаши Ю. Петрогенезис базанитов из трубок взрыва Северо-Минусинской впадины // Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков: материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 10-летию РФФИ. Иркутск, 2002, с. 343—345.

Лучицкий И.В. Вулканизм и тектоника девонских впадин Минусинского прогиба. М., Изд-во АН СССР, 1960, 276 с.

Мальковец В.Г. Состав и строение мезозойской верхней мантии под Северо-Минусинской впадиной (по данным изучения мантийных ксенолитов из щелочнобазальтоидных трубок взрыва): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2001, 235 с.

Михайлов М.Ю., Шацкий В.С. Силитовый нагреватель для высокотемпературной термокамеры // Минералогия эндогенных образований (по включениям в минералах). Новосибирск, Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1975, с. 109—110.

Петрушин Е.И., Базаров Л.Ш., Гордеева Е.И., Шарыгин В.В. Термокамера для петрологических исследований щелочных изверженных пород // Приборы и техника эксперимента, 2003, т. 46, № 2, с. 108—112.

Портнягин М.В., Симакин С.Г., Соболев А.В. Фтор в примитивных магмах офиолитового комплекса Троодос (о. Кипр): методика определения и основные результаты // Геохимия, 2002, № 7, с. 691—699.

Соболев Н.В., Кепежинская В.В., Овчинников Ю.И., Похиленко Н.П. Мантийные ксенолиты мезокайнозойских вулканических трубок Хакасии. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1988, 76 с.

Тимина Т.Ю., Шарыгин В.В., Головин А.В. Эволюция расплава в процессе кристаллизации базанитов трубки Тергешская, Северо-Минусинская впадина // Геохимия, 2006, № 8, с. 814—833.

Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Кузьмин М.И. Северо-Азиатский суперплюм в фанерозое: магматизм и глубинная геодинамика // Геотектоника, 2000, № 5, с. 3—29.

Boynnton W.V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies // Rare earth element geochemistry / Ed. P. Henderson. Amsterdam, Elsevier, 1984, p. 63—114.

Jochum K.P., Dingwell D.B., Rocholl A., Stoll B., Hofmann A.W., Becker S., Besmehn A., Besette D., Dietze H.-J., Dulski P., Erzinger J., Hellebrand E., Hoppe P., Horn I., Janssens K., Jenner G., Klein M., McDonough W.M., Maetz M., Mezger K., Münker C., Nikogosian I.K., Pickhart C., Raczek I., Rhede D., Seufert H.M., Simakin S.G., Sobolev A.V., Spettel B., Straub S., Vincze L., Wallianos A., Weck-

werth G., Weyer S., Wolf D., Zimmer M. The preparation and preliminary characterisation of eight geological MPI-DING reference glasses for in-situ microanalysis // *Geostandard Newsletters*, 2000, v. 24, p. 87—133.

Kerrick R., Wyman D.A. Review of developments in trace-element fingerprinting of geodynamic settings and their implications for mineral exploration // *Austral. J. Earth Sci.*, 1997, № 44, p. 465—487.

Leake B. Nomenclature of amphiboles: report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names // *Canad. Miner.*, 1997, v. 35, p. 219—246.

Rudnick R.L. Making continental crust // *Nature*, 1995, v. 378, p. 571—578.

Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Magmatism in the oceanic basins* / Eds. A.D. Saunders, M.J. Norry. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 1989, № 42, p. 313—345.

Wilson M. *Igneous petrogenesis*. London, Unwin Hyman, 1989, 466 p.

*Рекомендована к печати 30 января 2007 г.
А.С. Борисенко*

*Поступила в редакцию 12 мая 2006 г.,
после доработки — 11 января 2007 г.*