

УДК 549.514:549.01

РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ И ГЕНЕЗИС СФЕРИЧЕСКИХ ЗЁРЕН АКЦЕССОРНОГО ПСЕВДОРУТИЛА В ДЕВОНСКИХ ГРАНИТОИДАХ АЛЕЙСКО-ЗМЕИНОГОРСКОГО КОМПЛЕКСА (СЗ ЧАСТЬ РУДНОГО АЛТАЯ)

Новоселов Константин Леонидович,
nkonstantin1@rambler.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы обусловлена необходимостью исследования округлых форм микрозёрен (глобулей, сферул, шариков) акцессорного псевдорутила, впервые установленного в полифазном алейско-змеиногорском гранитоидном комплексе (D_{2-3}).

Цель работы: детально изучить их распространенность, парагенетическую ассоциацию в гранитоидах последовательных фаз, на электронно-микроскопическом уровне исследовать строение глобулей, их химический состав.

Методы исследования. Минералогические пробы весом 5...7 кг отбирались из коренных обнажений гранитоидов и из имеющих карьерных выработок. Аналитические исследования на электронном сканирующем микроскопе JSM-6510LV (Jeol Ltd) с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350+ проведены в лаборатории рентгеноспектрального анализа ИГМ СО РАН.

Результаты. Приводятся новые данные о механизме формирования глобулей псевдорутила и обосновывается эндогенный генезис минерала как продукта высокотемпературного окисления капельно-жидкого самородного интерметаллического соединения (Ti-Fe), обособившегося из расплава в особо восстановительных условиях, локально проявившихся на мантийном уровне. В длительно эволюционирующем мантийном магматическом очаге с участием глубинных газовых флюидов (H_2 , CH_4) в условиях дефицита кислорода создавался восстановительный режим, благоприятный для ликвации рудных интерметаллических соединений (Ti-Fe). Восстановительные условия наиболее активно проявились в расплавах заключительных инъекций (3–4 фазы). Поступившие с расплавом капельно-жидкие интерметаллиды (Ti-Fe) в условиях резко повышенного парциального давления кислорода подверглись полному высокотемпературному окислению с формированием на раннемагматической стадии закалённой однородной фазы псевдорутила с примесью Mn, Si, Al, Ca, K. Сделан вывод о геохимической специализации гранитоидного комплекса на железо и титан.

Ключевые слова:

Гранитоиды, акцессорные минералы, самородные интерметаллиды, глобули, псевдорутил.

Введение

Псевдорутил $Fe_2Ti_3O_9$, в отечественной минералогической литературе относится к числу малоизученных минералов. Генезис его обычно рассматривается как типично низкотемпературный экзогенный и представляется как промежуточный продукт окисления между ильменитом и рутилом [1]. Наряду с существующими представлениями о низкотемпературном образовании псевдорутила, исследованиями акцессорных минералов гранитоидов Чукотки [2] показана возможность формирования этого минерала в эндогенном процессе.

В гранитоидах впервые среди раннемагматических акцессорных и породообразующих минералов обнаружен псевдорутил с весьма необычной для него округлой формой зёрен. Подобные формы принято называть глобулями, сферулами, шариками и использовать в качестве типоморфного признака самородных металлов или интерметаллических соединений эндогенного происхождения [3–6].

Цель работы – исследование распространенности и химического состава глобулей псевдорутила в гранитоидах последовательных дифференциатов алюмо-силикатного расплава, парагенетической их ассоциации, выяснение физико-химической обстановки этапа формирования глобулей псевдорутила как продукта преобразования главных рудообразующих элементов – титана и железа. Как из-

вестно, с девонскими гипабиссальными гранитоидными интрузиями в пределах Рудного Алтая ассоциируют контактово-метасоматические месторождения магнетитовых руд, что определяет актуальность исследований.

Краткая петролого-геохимическая характеристика гранитоидов алейско-змеиногорского комплекса

Алейско-змеиногорский комплекс (D_{2-3}) включает три крупных гранитоидных массива – Новониколаевский, Алейский, Устьянский, и ряд более мелких тел, локализованных в структурах северной части Алейского поднятия Рудного Алтая между девонскими вулканогенно-осадочными прогибами; контролируются глубинными разломами северо-западного и субширотного простирания и характеризуются наличием комагматических связей с девонскими вулканитами каменевского комплекса [7, 8]. Наибольшую площадь (более 1000 кв. км) занимает Новониколаевский батолит, расположенный в северном окончании Алейского антиклинория, имеет сложное полифазное строение и включает полный ряд пород гомотропной последовательности – от ранней габброидной до заключительной, четвертой, лейкогранитной фазы с биотитовыми и биотит-мусковитовыми разностями. Габброиды первой фазы внедрения интенсивно метаморфизованы и образуют мелкие ксенолитовые тела в гранитоидах после-

дующих фаз. Наибольшим распространением пользуются гранитоиды – производные второй, главной, фазы и заключительной лейкогранитовой. Алейский и Устьянский массивы, значительно меньшие по площади (около 300 кв. км каждый), расположены соответственно на юге и юго-западе поднятия. Доминирующие породы Алейского массива – тоналиты и плагиограниты, приобретающие в тектонически ослабленных зонах гнейсовидный облик с биотитом и зеленой роговой обманкой. Гранитоиды Устьянского массива, лейкократовые по составу, параллелизуются с лейкогранитами заключительной четвертой фазы.

Основные петрохимические характеристики гранитоидов в краткой констатации сводятся к следующему (от плагиогранитов и тоналитов ранней фазы к лейкогранитам заключительной): 1) возрастают коэффициент агапайности (0,56...0,90) и общей щёлочности пород при доминировании Na_2O над K_2O , за исключением лейкогранитов Устьянского массива, имеющих калиевую специализацию; 2) заметно возрастает глинозёмистость пород (0,78...0,91); 3) растёт коэффициент железистости (0,77...3,75) при сравнительно выдержанном коэффициенте окисленности железа (0,81...0,84) за исключением лейкоплагиогранитов третьей фазы, в которых этот показатель резко повышается до 1,22; 4) снижаются коэффициенты известковистости (0,43...0,09) и титанистости (9,89...5,44).

Характерные геохимические особенности гранитоидов – отсутствие элементов-примесей халькофильной группы, весьма ограниченный набор и низкие содержания сидерофильных Co, Ni, Cr, Sc, V, которые концентрируются преимущественно в наиболее ранних дифференциатах гранитоидного расплава. Наиболее многочисленную группу составляют литофильные элементы, среди которых содержание Ti в плагиогранитах главной фазы превышает значение кларка (коэффициент концентрации Ti 1,22...2,2), в породах последующих фаз KkTi снижается до 0,43...0,95. Гранитоиды заметно обогащены РЗЭ, в том числе Y, образующим избыточные концентрации ($\text{KkY}=1,2...1,95$), за исключением плагиогранитов Алейского массива, в которых содержание этого элемента относится к дефицитным.

Ведущая ассоциация акцессорных минералов в плагиогранитах и тоналитах главной фазы титаномагнетит-ильменит-феррорутит-циркон-апатит-сфен-ортитовая; в лейкогранитах заключительной фазы сменяется на мартитизированный титаномагнетит-гематит-циркон-топаз-флюорит-редкоземельную с Y, Ce, La и уран-ториевую. Среди акцессорных минералов в гранитоидах рассматриваемых фаз отсутствуют сульфиды магматического генезиса, что также подчеркивает дефицит серы в гранитоидных расплавах и достаточно высокий потенциал кислорода.

По условиям формирования, петролого-геохимическим особенностям гранитоидные массивы

рассматриваются как индивидуализированные части крупного плутона, сформированного из единого магматического центра активизированной континентальной окраины в средне-позднедевонское время. Новониколаевский и Алейский массивы близки к гранитам I-типа, Устьянский относится к А-типу [7, 8].

Методика исследований включает: 1) полевой отбор минералогических проб гранитоидов последовательных интрузивных фаз комплекса с последующей их лабораторной обработкой и извлечением акцессорных минералов; 2) аналитические исследования.

Минералогические пробы весом 5...7 кг отбирались из коренных обнажений гранитоидов и из имеющихся карьерных выработок. Изготовление препаратов (шашек) для анализа химического состава акцессорных минералов выполнено ведущим инженером ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) Ю.И. Маликовым. Аналитические исследования на электронном сканирующем микроскопе JSM-6510LV (Jeol Ltd) с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350+ проведены в лаборатории рентгеноспектрального анализа ИГМ СО РАН (г. Новосибирск, аналитик мл. науч. сотр. М.В. Хлестов, при участии автора).

Результаты исследований

Псевдорутил в единичных округлых зёрнах установлен в электромагнитной фракции протолок плагиогранит-порфира и лейкоплагиогранита соответственно второй и третьей интрузивных фаз (Алейский массив) и в лейкограните заключительной четвертой фазы (Устьянский массив). В гранитоидах главной фазы (Новониколаевский батолит) глобулы псевдорутила не обнаружены; единичная сфераула этого минерала встречена в лейкоплагиогранитах – производных третьей фазы, слагающих небольшое тело в северном окончании Новониколаевского массива.

Морфология зёрен псевдорутила в изученных породах однотипная – мелкие шарики размером 0,1...0,2 мм, реже несколько вытянутые, грушевидные. В лейкограните Устьянского массива кроме одиночных шариков обнаружен сросток двух глобулей, близких по размерам – 0,1 и 0,08 мм в диаметре. Цвет минерала серовато-черный с бронзоватым отливом, блеск обычно матовый, реже металловидный. На поверхности сферул и в их разрезах обычно наблюдаются многочисленные поры – следы газовых включений от микронных размеров до сотых долей миллиметра. Отдельные, наиболее крупные, пустотки заполнены агрегатом зёрен породообразующих минералов – кварца (рис. 1), плагиоклаза (An_{10-15}), калиевого полевого шпата, титанистого биотита (рис. 2). Ровные, дугообразно-вогнутые или близкие к прямоугольным границы срастаний зёрен породообразующих минералов с поверхностью глобулей свидетельствуют о заполнении их пустоток породообразующими минералами после кристаллизации глобулей. Электронно-

Таблица 1. Химический состав глобулей псевдорутила из гранитоидов различных интрузивных фаз, мас. %

Table 1. Chemical composition of pseudorutile globules from granitoids of different igneous phase, wt. %

Порода (интрузивная фаза) Rock (igneous phase)	№	TiO ₂	FeO	MnO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	K ₂ O	Сумма Total
Алейский массив/Aleysk massif									
Плагиигранит-порфир (вторая, главная) Plagiogranite porphyry (second, main)	1	55,95	15,58	7,71	7,01	5,88	6,03	–	98,16
	2	56,86	16,06	7,55	6,82	5,65	5,72	–	98,67
	3	55,61	15,77	7,75	6,93	6,1	6,28	–	98,45
	4	55,91	15,8	7,89	7,18	6,14	6,11	–	99,04
	5	57,43	15,58	6,96	6,95	5,61	5,88	–	98,41
	6	57,43	14,88	6,88	6,9	5,69	5,96	–	97,75
	7	56,95	15,35	7,22	6,93	5,86	6,09	–	98,4
	$\bar{X} (\sigma)$	56,59 (0,57)	15,57 (0,14)	7,42 (0,16)	6,96 (0,01)	5,85 (0,05)	6,01 (0,03)	–	98,41
Лейкоплагиигранит (третья) Leucoplagiograne (third)	1	52,89	13,69	6,69	7,22	10,25	7,89	–	98,6
	2	52,29	13,44	6,96	7,12	9,84	8,83	–	98,5
	3	52,36	13,79	7,17	6,82	9,97	8,63	–	98,7
	4	53,13	13,6	6,9	6,88	9,69	8,73	–	98,9
	5	52,81	13,83	7,27	6,99	9,69	8,7	–	99,3
	6	52,64	13,48	7,23	6,84	9,71	8,79	–	98,7
	7	52,38	13,77	7,23	6,86	9,78	8,56	–	98,6
	$\bar{X} (\sigma)$	52,64 (0,1)	13,66 (0,02)	7,06 (0,05)	6,96 (0,02)	9,85 (0,04)	8,6 (0,1)	–	98,76
Новониколаевский массив Novonikolaevsky massif									
Лейкоплагиигранит (третья) Leucoplagiograne (third)	1	51,49	15,8	6,51	6,5	12,52	5,08	0,61	98,5
	2	52,13	16,0	6,37	6,41	11,98	5,04	0,61	98,6
	3	51,19	15,4	6,99	6,65	12,58	5,39	0,59	98,8
	4	51,16	16,4	6,9	6,52	12,79	5,36	0,69	99,8
	5	52,13	15,6	6,4	6,52	12,75	5,02	0,65	99,1
	6	52,08	15,9	6,55	6,41	12,41	4,95	0,67	98,9
	7	51,21	16,2	6,37	6,58	12,0	5,14	0,52	98,0
	$\bar{X} (\sigma)$	51,63 (0,21)	15,9 (0,12)	6,58 (0,07)	6,51 (0,007)	12,43 (0,1)	5,14 (0,03)	0,62 (0,003)	98,8
Устьянский массив Ustyansky massif									
Лейкогранит (четвёртая) Leucograne (fourth)	1	55,75	15,9	7,0	7,26	6,33	5,39	0,27	97,89
	2	56,66	15,57	6,96	7,14	6,29	5,48	–	98,11
	3	56,86	15,81	6,71	7,37	6,03	5,44	–	98,23
	4	56,88	15,59	6,95	7,26	5,78	5,51	–	97,96
	5	56,63	15,7	6,95	7,18	6,25	5,61	–	98,31
	6	56,16	15,85	7,14	7,22	6,16	5,48	–	98,02
	7	55,51	15,63	7,17	7,35	6,48	5,47	0,2	97,82
	$\bar{X} (\sigma)$	56,35 (0,3)	15,72 (0,02)	6,98 (0,02)	7,25 (0,01)	6,19 (0,05)	5,48 (0,01)	–	97,97

Примечание: здесь и в других таблицах FeO принято как Fe₂O₃; $\bar{X}$ – среднее содержание, σ – величина дисперсии; прочерк – элемент не установлен.

Note: in Tables 1 and 2 FeO is conventionally termed as Fe₂O₃; $\bar{X}$ – average content; σ – dispersion value; dash – below detection limits.

микроскопическими исследованиями различных уровней срезов матрицы глобулей псевдорутила выявлено её однородное строение.

Химический состав анализировался как площадным сканированием матрицы зерна, так и по его профилю с расстоянием между анализируемыми точками 5...6 μm (рис. 1). В составе псевдорути-ла (табл. 1) постоянно присутствуют примеси элементов литофильной группы – Mn, Al, Si, Ca. В различных концентрациях названные литофильные элементы также указываются в составе

псевдорути-ла в ряде работ зарубежных исследова-телей [9–13]. Стабильной примесью K (0,52...0,69 мас. %) выделяется псевдорутил лей-коплагиигранитов – производных третьей фазы, этот же элемент зафиксирован в меньших концен-трациях (0,2...0,27 мас. %) в двух периферийных точках – 1 и 7 (рис. 1) профиля зерна псевдорути-ла из лейкогранита Устьянского массива, и его присутствие, видимо, связано с ассимиляцией ка-лия кристаллизующимся глобулем из окружаю-щего алюмосиликатного расплава.

Кристаллохимические формулы псевдорутила $\text{Fe}_2\text{Ti}_3\text{O}_9$ (вычислены по средним содержаниям компонентов).

Гранит-порфир, 2 фаза (Алейский массив)

$(\text{Fe}_{0,87}\text{Mn}_{0,418}\text{Si}_{0,388}\text{Ca}_{0,43})_{2,106}(\text{Ti}_{2,845}\text{Al}_{0,543})_{3,388}\text{O}_9$

Лейкоплагиогранит, 3 фаза (Алейский массив)

$(\text{Fe}_{0,746}\text{Mn}_{0,391}\text{Si}_{0,64}\text{Ca}_{0,602})_{2,379}(\text{Ti}_{2,59}\text{Al}_{0,534})_{3,124}\text{O}_9$

Лейкоплагиогранит, 3 фаза

(Новониколаевский массив)

$(\text{Fe}_{0,862}\text{Mn}_{0,363}\text{Si}_{0,806}\text{Ca}_{0,356})_{2,387}(\text{Ti}_{2,517}\text{Al}_{0,498})_{3,015}\text{O}_9$

Лейкогранит, 4 фаза (Устьянский массив)

$(\text{Fe}_{0,876}\text{Mn}_{0,393}\text{Si}_{0,412}\text{Ca}_{0,393})_{2,074}(\text{Ti}_{2,825}\text{Al}_{0,571})_{3,396}\text{O}_9$

Содержание примесных элементов по профилю зерна псевдорутила варьирует незначительно – величина дисперсии находится в пределах 0,02...0,07 (табл. 1), лишь незначительный разброс концентраций отмечен для Ti – главного минералообразующего элемента, особенно в глобуле из плагиогранит-порфира, где величина дисперсии наиболее высокая – 0,67. Заметные отличия химического состава псевдорутила из гранитоидов последовательных интрузивных фаз наблюдаются по содержанию в них Si и Ca. Так, глобулы псевдорутила лейкоплагиогранитов третьей фазы (Алейский массив) выделяются повышенной известковистостью и кремнезёмистостью, что в целом согласуется с петрохимическими особенностями этих пород. Заметно обособляется химический состав глобулы псевдорутила лейкоплагиогранитов 3 фазы (Новониколаевский массив) примесью калия и насыщенностью кремнезёмом – до 12,43 мас. % (табл. 1). По своим петрохимическим особенностям породы, производные рассматриваемой фазы, характеризуются щёлочностью не калиевой, а существенно натриевой направленности ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=4,88/1,76$ мас. %), повышенными и резко варьирующими содержаниями SiO_2 (75,62–81,53 мас. %), что отразилось и на кремнезёмистости глобул псевдорутила. В табл. 1 приведены кристаллохимические формулы глобул псевдорутила, вычисленные по средним содержаниям в них компонентов. Как известно, Fe относится к числу наиболее изоморфнофильных элементов [14] и охотно замещается по схеме изовалентного или гетеровалентного изоморфизма: $\text{Fe}^{3+} \leftarrow \text{Mn}^{2+}, \text{Ca}^{2+}, \text{Si}^{4+}$; несколько меньшей изоморфной ёмкостью обладает Ti^{4+} и с Al^{3+} образует ограниченный изоморфизм [14, 15]. Калий в составе псевдорутила участвует как неструктурная примесь и в его формуле не указан. В приведённых кристаллохимических формулах несколько превышены суммы катионов групп Fe^{3+} и Ti^{4+} , что, возможно, обусловлено присутствием в минерале воды, наличие которой в псевдорутиле в форме $(\text{OH})^-$ или H_2O отмечается в работах [10, 11]. Неучтенное количество H_2O в его кристаллохимической фор-

муле, видимо, обусловило избыток атомных количеств элементов в позициях Fe^{3+} и Ti^{4+} . Возможно, присутствием H_2O в анализируемом псевдорутиле объясняется несколько пониженная сумма химического состава глобул (табл. 1).

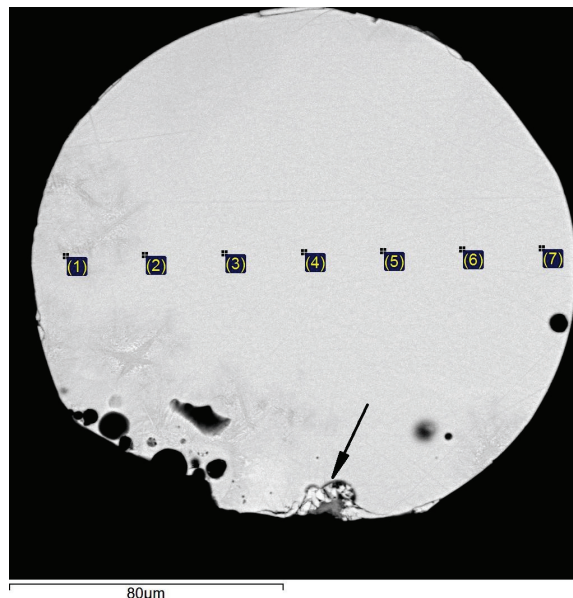


Рис. 1. Срез глобулы псевдорутила с многочисленными мелкими округлыми пустотками по периферии зерна. Стрелкой указана пустотка, заполненная агрегатом кристаллитов кварца. Цифрами показаны номера точек анализов, приведённых в табл. 1. Лейкоплагиогранит, Алейский массив. Здесь и на последующих рисунках изображение в обратно рассеянных электронах

Fig. 1. Pseudorutile globule section with numerous rounded blebs along grain periphery. The arrow indicates the bleb with quartz crystalline grain aggregate filling. The numbers indicate analysis points, referred in table 1. Leucoplagiogranite, Aleysk massif. In all diagrams – backscattered electron image

В лейкограните Устьянского массива, наряду с однородными глобулами, обнаружено единичное сферическое зерно с чётко проявившейся сложнокombинированной структурой распада двухкомпонентного твёрдого раствора в виде чередующихся светлых и темных фаз. Наибольшую площадь матрицы занимает светлая фаза, образующая два морфологических типа структур: 1) конусовидную микроглобулярную, по периферии зерна переходящую в эмульсионную; 2) линейно-ориентированную с тонкими перистыми, веероподобными прерывистыми полосками (рис. 3). Химический состав светлой и тёмной фаз незначительно отличается лишь концентрациями минералообразующих компонентов, главным образом Ti, Fe, Mn при сравнительно неизменных в светлых и тёмных фазах содержаниях Al, Si, Ca (табл. 2).

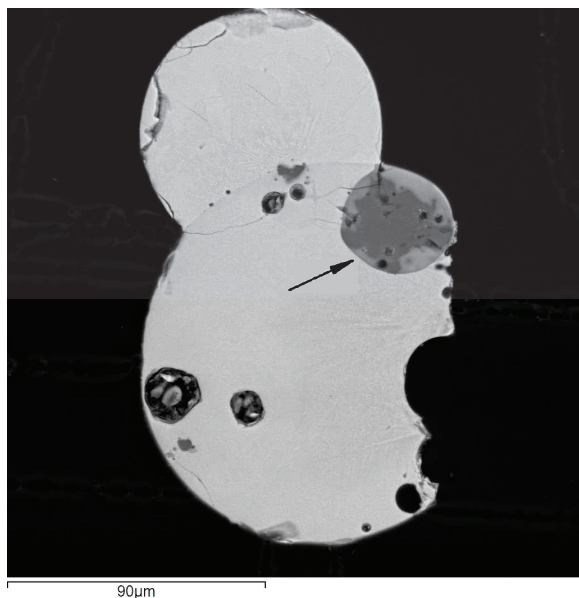


Рис. 2. Срез сросстка двух глобул псевдорутила с многочисленными округлыми пустотками микронных и более крупных размеров (0,02...0,04 мм), приуроченными к периферии зёрен. Стрелкой указана округлая пустотка с ровными границами, заполненная зёрнами кварца, ортоклаза, титанистого биотита. Ровные вогнутые границы среза глобулы (справа) обусловлены выпавшим агрегатом зёрен минералов при изготовлении препарата. Лейкогранит, Устьянский массив

Fig. 2. Cross-section of two pseudorutile globule growth with numerous micron or large-sized voids (0,02...0,04 mm), confined to grain periphery. The arrow shows rounded void with even edges, filled with quartz, orthoclase, titanite grains. Even concave boundaries of globule cross-section (right) is caused by precipitated aggregates from mineral grains during sample preparation. Leucogranite, Ustyansky massif

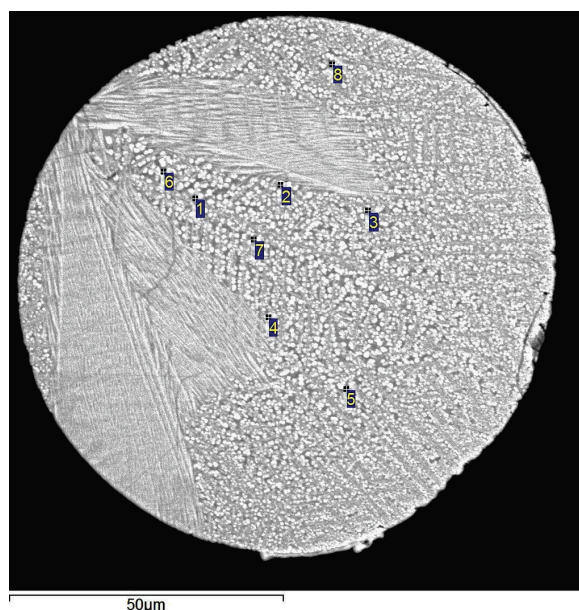


Рис. 3. Сложно-комбинированная структура распада твёрдого раствора псевдорутила

Fig. 3. Complex-combined structural breakdown of solid pseudorutile solution

Таблица 2. Химический состав светлых и тёмных фаз структуры распада твёрдого раствора псевдорутила, мас. %

Table 2. Chemical composition of light and dark zones of breakdown structure of pseudorutile solid solution, wt. %

№ точек анализов Points of analysis	TiO ₂	FeO	MnO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Сумма Total
Светлая фаза/Light zone							
1	50,04	19,62	12,05	7,24	5,65	5,71	100,3
2	47,41	18,64	11,21	7,95	6,89	7,37	99,5
3	44,12	15,1	8,44	10,52	9,76	10,6	98,5
4	50,7	17,4	8,15	8,13	7,4	6,34	98,1
Тёмная фаза/Dark zone							
5	57,28	15,99	8,74	7,01	5,26	5,57	99,9
6	57,3	16,33	8,69	6,88	5,52	5,58	100,0
7	55,75	13,07	6,91	9,16	7,53	7,3	99,7
8	57,85	15,57	8,2	7,33	5,37	5,67	100,0

Примечание. Номера точек анализов соответствуют номерам точек на рис. 3.

Note: Number of analysis points corresponds to point numbers in Fig. 3.

Обсуждение результатов исследований

Сферическая форма зёрен самородных металлов и интерметаллических соединений в эндогенных образованиях широко используется петрологами как типоморфный признак ликвационной природы рудного вещества, отделившегося от магматического расплава в форме капель [3, 4]. Тенденция к отделению металлизированных рудных капель, локально проявившаяся в гранитоидах изучаемого комплекса, ранее установлена автором [6] на примере единичных находок глобул феррита, а также самородного железа с примесью Ti, Mn и продукта их окисления – магнетита.

Анализ распространённости сферических зёрен псевдорутила, их строения, химического состава и парагенетической ассоциации в гранитоидах последовательных фаз позволяет рассматривать их формирование как результат полного окисления изначально капельно-жидкого интерметаллического соединения (Ti–Fe), отделившегося из алюмосиликатного расплава. Согласно существующим представлениям [3, 16–18], ликвация рудных капель происходит в глубинном магматическом очаге, в его локальных участках и в сильно восстановительной среде при поступлении в расплав мантийных восстановленных газовых флюидов, которые представлены преимущественно водородными, реже метановыми разностями. По данным термодинамических и петрологических исследований [16–18], отделение от расплава капель литофильных элементов, к числу которых относится легко окисляемый Ti, требует особо восстановительных условий, однако в соединении с Fe рудные капли становятся более устойчивыми к окислительным условиям среды.

Поступившие с расплавом в камеру кристаллизации обособившиеся интерметаллические соединения (Ti–Fe) находились в капельно-жидком состоянии, и в процессе горизонтального растекания расплава происходило слияние отдельных их ка-

пель, что наглядно проявилось в лейкограните Устьянского массива – производного заключительной фазы (рис. 2). По данным А. Хансена и К. Андерко [19], температура начала кристаллизации сплава Ti_2Fe (в ат. % ~70 % Ti и ~30 % Fe) составляет 1085 °С. Температура кристаллизации изучаемых гранитоидов, определённая по минералогическому и петрохимическому геотермометрам [20], составляет 850–900 °С. Наблюдаемые взаимоотношения раннемагматических порообразующих минералов (кварца, плагиоклаза, биотита) с глобулями псевдорутила (рис. 2), а также наличие включений округлых зёрен этого минерала в плагиоклазе (An_{10-15}) позволяют сделать вывод о субликвидусной кристаллизации капель интерметаллида (Ti–Fe) при $T \leq 1085$ °С. В условиях резкого увеличения окислительного потенциала гипабиссальной камеры кристаллизации ещё жидкие и сохраняющие высокую T обособившиеся капли интерметаллида (Ti–Fe), находясь в неравновесном состоянии с окружающим расплавом, вступают в реакцию с окислительной газовой фазой, и в первую очередь окисляется Ti, как элемент с наибольшим сродством к кислороду. В реакцию высокотемпературного окисления капли интерметаллида из окружающего расплава вовлекаются другие оксифильные петрогенные элементы ранней стадии кристаллизации – Mn, Al, Si, Ca, и участвуют в формировании кристаллической решётки псевдорутила, унаследовавшего необычную для данного минерала сферическую форму. В составе глобулей псевдорутила, как отмечалось, не исключается присутствие воды в форме (ОН)[–] или кристаллогидратной H_2O . Наличие многочисленных пор на поверхности сферул и в их срезах указывает на имевшую место сорбцию жидким интерметаллидом (Ti–Fe) из окружающего расплава водорода, который в процессе высокотемпературного окисления легко трансформировался в H_2O , также участвовавшую в образовании псевдорутила. Выдержанный химический состав по площади матрицы глобуля псевдорутила указывает на кратковременную и активно прошедшую до конца реакцию высокотемпературного окисления жидкого интерметаллида (Ti–Fe) с формированием однородной закалённой фазы. Проявившаяся сложно-комбинированная структура распада твёрдого раствора в единичном зерне псевдорутила, видимо, объясняется неодинаковой степенью окисления в камере кристаллизации Устьянского массива. Различная степень высокотемпературного окисления нередко проявляется даже в отдельных участках одного

кристалла [21]. Кроме того, повышенная щёлочность расплава калиевой направленности, характерная для лейкогранитов данного массива, также способствовала более длительному и интенсивному окислению интерметаллида.

Ассоциация примесных элементов в глобулях псевдорутила в производных последовательных дифференциатов остаётся неизменной и свидетельствует о длительно функционирующем глубинном мантийном источнике алюмосиликатного расплава, обогащённого литофильными элементами и обеднённого халькофильными. Повышенная кремнезёмистость и появление примеси калия в глобулях лейкоплагиогранитов 3 фазы (Новониколаевский массив), видимо, обусловлены активизацией флюидно-магматического взаимодействия в силикатном расплаве. Поступающие мантийные флюиды в виде соединений KCl и KF повышают относительную долю калия в расплаве, а флюиды KCl, кроме того, стимулируют рост кремнезёмистости пород [22, 23]. Насыщенность псевдорутила кремнезёмом и появление примеси K_2O указывает на активность существенно хлоридного флюида, участие которого в расплаве проявилось и в составе акцессорного хлорапатита, биотита, роговой обманки.

Выводы

1. Происхождение глобулей псевдорутила в девонских гранитоидах алейско-змеиногорского комплекса связано с кратковременной реакцией полного высокотемпературного окисления капельно-жидких обособлений интерметаллических соединений титана и железа, поступивших с расплавом в гипабиссальную камеру с резко повышенной активностью кислорода. Элементы-примеси псевдорутила отражают химизм среды кристаллизации расплава раннемагматической, субликвидусной, стадии кристаллизации.
2. В длительно эволюционирующем мантийном магматическом очаге с участием глубинных газовых флюидов (H_2 , CH_4) в условиях дефицита кислорода создавался восстановительный режим, благоприятный для ликвации рудных интерметаллических соединений (Ti–Fe). Восстановительные условия в объёмах расплава носили локальный характер и наиболее активно проявились в расплавах заключительных инъекций (3–4 фазы) с участием калиевых хлоридных флюидов, способствующих насыщению расплавов кремнезёмом и калием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минералы. Справочник / под ред. акад. Ф.В. Чухрова. Т. II. Вып. 3. – М.: Наука, 1967. – 675 с.
2. Полякова Е.В. Ассоциация ильменита, пирофанита и псевдорутила в гранитах Северного массива (Чукотка) // Записки Горного института. – 2013. – Т. 200. – С. 258–262.
3. Самородное минералообразование в платформенных базитах / Б.В. Олейников, А.В. Округин, М.Д. Томшин и др. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1985. – 188 с.
4. Гребенников А.В. Эндогенные сферулы мел-палеогеновых игнимбритовых комплексов Якутинской вулcano-тектонической структуры (Приморье) // Зап. Рос. Минер. общ-ва. – 2001. – Ч. СХХХ. – № 3. – С. 56–68.
5. Гребенников А.В., Щека С.А., Карабцов А.А. Силикатно-металлические сферулы и проблема механизма игнимбритовых извержений (на примере Якутинской вулcano-тектонической структуры) // Вулканология и сейсмология. – 2012. – № 4. – С. 3–22.
6. Новоселов К.Л. Генетические особенности самородного железа и продуктов его окисления в девонских гранитоидах Алейско-Змеиногорского комплекса (северо-западная часть Рудного Алтая) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 9. – С. 56–67.
7. Туркин Ю.А. Тоналит-плагиогранит-лейкогранитовая формация Рудного Алтая // Природные ресурсы Горного Алтая. – 2009. – № 2. – С. 70–79.
8. Туркин Ю.А., Новоселов К.Л. Петролого-геохимические особенности девонских гранитоидов северо-западной части Рудного Алтая // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 5–15.
9. Hansen E., Reimink J., Harlov D. Titaniferous accessory minerals in very low-grade metamorphic rocks, Keweenaw Peninsula Michigan, USA // Lithos. – 2010. – № 116. – P. 167–174.
10. Pownceby M.I., Sparrow G.J., Fisher-White M.J. Mineralogical characterisation of Eucla Basin ilmenite concentrates – First results from a new global resource // Minerals Engineering. – 2008. – № 21. – P. 587–597.
11. Medaris L.G., Jr, Fournelle Jh.H. Pseudorutile in the Baraboo Range, Wisconsin: First recognition as a metamorphic mineral // The Canadian Mineralogist. – 2012. – V. 50. – P. 1165–1172.
12. A new Al-rich hydroxilian pseudorutile from Kalimantan, Indonesia / I.E. Grey, P. Bordet, N.C. Wilson, R. Townend, T.J. Bastow, M. Brunelli // American Mineralogist. – 2010. – V. 95. – P. 161–170.
13. Yawooz A. Kettanah, Sabah A. Ismail. Heavy mineral concentrations in the sandstones of Amij Formation with particular emphasis on the mineral chemistry and petrographic characteristics of monazite, western desert of Iraq // Journal of African Earth Sciences. – 2016. – V. 123. – P. 350–369.
14. Макаров Е.С. Изоморфизм атомов в кристаллах. – М.: Атомиздат, 1973. – 288 с.
15. Пятенко Ю.А., Воронков А.А., Пудовкина З.В. Минералогическая кристаллохимия титана. – М.: Наука, 1976. – 155 с.
16. Флюидный режим формирования мантийных пород / Ф.А. Летников, Г.Д. Феоктистов, И.М. Остафийчук и др. – Новосибирск: Наука, 1980. – 143 с.
17. Никольский Н.С. Флюидный режим эндогенного минералообразования. – М.: Наука, 1987. – 199 с.
18. Oxidation Kinetics, Structural Changes and Element Migration during Oxidation Process of Vanadium-titanium Magnetite Ore / Feng Pan, Qing-shan Zhu, Zhan Du, Hao-yan Sun // Journal of Iron and Steel Research, International. – 2016. – V. 23. – Iss. 11. – P. 1160–1167.
19. Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. Т. 2. – М.: Металлургиздат, 1962. – 1165 с.
20. Новоселов К.Л., Туркин Ю.А. Типоморфизм акцессорного титаномagnetита девонских гранитоидов Северо-Западной части Рудного Алтая // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 5–16.
21. Магнетизм и условия образования изверженных горных пород / Д.М. Печерский, В.И. Бачин, С.Ю. Бродская и др. – М.: Наука, 1975. – 288 с.
22. Маракушев А.А. Петрогенезис. – М.: Недра, 1988. – 293 с.
23. Маракушев А.А. Петрогенезис и рудообразование (геохимические аспекты). – М.: Наука, 1979. – 263 с.

Поступила 06.02.2017 г.

Информация об авторах

Новоселов К.Л., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 549.514:549.01

DISTRIBUTION AND GENESIS OF SPHERICAL ACCESSORY PSEUDORUTILE GRAINS IN DEVONIAN GRANITOIDS OF ALEYSKO-ZMEINOGORSK COMPLEX (N-W RUDNI ALTAI)

Konstantin L. Novoselov,
nkonstantin1@rambler.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the issue is caused by the need to study the rounded micro-grains (globules, spherules) of pseudorutile accessories found in Aleysko-Zmeinogorsk granitoid complex (D_{2-3}).

The aim of the research is to study in details occurrence and chemical composition of pseudorutile globules in granitoids being subsequent alumina-silicate melt differentiates, paragenetic associations, pseudorutile globule formations as altered product of primary ore-forming elements – titanium and ferrum.

The research methods. Mineralogical samples of 5...7 kg were extracted from both granitoid outcroppings and quarries. Analytical analysis was carried out on electron scanning microscope (ESM) JSM-6510LV (Jeol Ltd) and energy-dispersive spectrometer INCA Energy 350+ in the Laboratory of X-ray Spectrum Analysis, Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, RAS (Novosibirsk).

The results. The paper introduces new data on formation mechanism of pseudorutile globules. The endogenous genesis of mineral as a product of high-temperature oxidation of drop-liquid native intermetallic compound (Ti-Fe) from melt under reducing conditions is proved. Throughout the mantle magmatic chamber evolution involving deep gaseous fluids (H_2 , CH_4) under conditions of oxygen deficiency the reduction regime was formed being favorable for intermetallide ore compound (Ti-Fe) segregation. Reducing conditions appeared within the melt itself and especially, in final phase melts (3–4). Under conditions of increasing facies pressure of oxygen the liquid-drop intermetallides (Ti-Fe) are subjected to high-temperature oxidation within the early magmatic stage of homogeneous pseudorutile phase with Mn, Si, Al, Ca, K impurities.

Key words:

Granitoids, accessory minerals, native intermetallides, globules, pseudorutile.

REFERENCES

1. *Mineraly. Spravochnik* [Minerals. Reference book]. Ed. by F.V. Chukhrov. Vol. II, Iss. 3. Moscow, Nauka Publ., 1967. 675 p.
2. Polyakova E.V. Associations of ilmenite, pyrophanite and pseudorutile in granites of Severnoe massif (Chukotka). *Zapiski Gornogo instituta*, 2013, vol. 200, pp. 258–262. In Rus.
3. Oleynikov B.V., Okrugin A.V., Tomshin M.D. *Samorodnoe mineraloobrazovanie v platformennykh bazitakh* [Native mineral formations in platform basites]. Yakutsk, YaF SO ANSSSR Press, 1985. 188 p.
4. Grebennikov A.V. Endogenous spherules of Cretaceous-Paleogene ignimbrite complexes in Yakutsk volcano-tectonic structure (Primorye). *Proceedings of Russian Mineralogical Society*, 2001, Ch. CXXXX, no. 3, pp. 56–68. In Rus.
5. Grebennikov A.V., Shcheka S.A., Karabtsov A.A. Silikatno-metallicheskie sferuly i problema mekhanizma ignimbritovykh izverzheniy (na primere Yakutinskoy vulkano-tectonicheskoy struktury) [Silicate-metallic spherules and mechanisms of ignimbrite eruptions (case study: Yakutsk volcano-tectonic structure)]. *Volcanology and seismology*, 2012, no. 4, pp. 3–22.
6. Novoselov K.L. Genetic features of native iron and its oxidation products in Devonian granitoids of Aleysko-Zmeinogorsk complex (N-W Rudni Altai). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 9, pp. 56–67. In Rus.
7. Turkin Yu.A. Tonalit-plagiogranit-leykogranitovaya formatsiya Rudnogo Altaya [Tonalite-plagiogranite-leucogranite formation in Rudni Altai]. *Prirodnye resursy Gornogo Altaya*, 2009, no. 2, pp. 70–79.
8. Turkin Yu.A., Novoselov K.L. Petrological and geochemical features of Devonian granitoids in north-west part of Rudni Altai. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 5–15. In Rus.
9. Hansen E., Reimink J., Harlov D. Titaniferous accessory minerals in very low-grade metamorphic rocks, Keweenaw Peninsula Michigan, USA. *Lithos*, 2010, no. 116, pp. 167–174.
10. Powncely M.I., Sparrow G.J., Fisher-White M.J. Mineralogical characterisation of Eucla Basin ilmenite concentrates – First results from a new global resource. *Minerals Engineering*, 2008, no. 21, pp. 587–597.
11. Medaris L.G., Jr, Fournelle J.H. Pseudorutile in the Baraboo Range, Wisconsin: First recognition as a metamorphic mineral. *The Canadian Mineralogist*, 2012, vol. 50, pp. 1165–1172.
12. Grey I.E., Bordet P., Wilson N.C., Townend R., Bastow T.J., Brunelli M. A new Al-rich hydroxilian pseudorutile from Kalimantan, Indonesia. *American Mineralogist*, 2010, vol. 95, pp. 161–170.
13. Yawooz A., Kettanah, Sabah A. Ismail. Heavy mineral concentrations in the sandstones of Amij Formation with particular emphasis on the mineral chemistry and petrographic characteristics of monazite, western desert of Iraq. *Journal of African Earth Sciences*, 2016, no. 123, pp. 350–369.
14. Makarov E.S. *Izomorfizm atomov v kristallakh* [Isomorphism of atoms in crystals]. Moscow, Atomizdat Publ., 1973. 288 p.
15. Pyatenko Yu.A., Voronkov A.A., Pudovkina Z.V. *Mineralogicheskaya kristalloghiya titana* [Mineralogical crystallochemistry of titanium]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 155 p.
16. Letnikov F.A., Feoktistov G.D., Ostafiychuk I.M. *Flyuidnyy rezhim formirovaniya mantiynykh porod* [Fluid regime in mantle rock formation]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980. 143 p.
17. Nikolskiy N.S. *Flyuidny rezhim endogennogo mineraloobrazovaniya* [Fluid regime in endogenous mineral formation]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 199 p.
18. Feng Pan, Qing-shan Zhu, Zhan Du, Hao-yan Sun. Oxidation Kinetics, Structural Changes and Element Migration during Oxidation Process of Vanadium-titanium Magnetite Ore. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2016, vol. 23, Iss. 11, pp. 1160–1167.

19. Khansen M., Anderko K. *Struktury dvoynykh splavov* [Structure of two-component alloys]. Moscow, Metallurizdat Publ., 1962. Vol. 2, 1165 p.
20. Novoselov K.L., Turkin Yu.A. Typomorphism of accessory titanium-magnetite in Devonian granitoids (N-W Rudni Altai). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 5–16. In Rus.
21. Pecherskiy D.M., Bachin V.I., Brodskaya S.Yu. *Magnetizm i usloviya obrazovaniya izverzhennykh gornykh porod* [Magnetism and igneous rock formation conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 288 p.
22. Marakushev A.A. *Petrogenezis* [Petrogenesis]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 293 p.
23. Marakushev A.A. *Petrogenezis i rudoobrazovanie (geokhimicheskie aspekty)* [Petrogenesis and mineral formation (geochemical aspects)]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 263 p.

Received: 6 February 2017.

Information about the authors

Konstantin L. Novoselov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.