

Минералогия

УДК 549.731.13:549.02

ТИПОМОРФИЗМ АКЦЕССОРНОГО ТИТАНОМАГНЕТИТА ДЕВОНСКИХ ГРАНИТОИДОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ РУДНОГО АЛТАЯ

Новоселов Константин Леонидович,

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: nkonstantin1@rambler.ru.

Туркин Юрий Александрович,

канд. геол.-минерал. наук, ведущий геолог Региональной партии ОАО «Горно-Алтайская экспедиция», Россия, 659420, Алтайский край, Бийский р-он, с. Малоенисейское, ул. Советская, 15. E-mail: jurtour@yandex.ru.

Актуальность определяется необходимостью минералого-геохимических исследований потенциально рудоносных гранитоидных комплексов Рудного Алтая с целью расширения минерально-сырьевой базы России.

Цель работы – исследование закономерностей распределения в гранитоидах акцессорного титаномагнетита, особенностей химического состава, строения его зёрен, парагенетической ассоциации и выделение типоморфных признаков, определяющих условия формирования полифазного алейско-змеиногорского гранитоидного комплекса.

Методы исследования: определение химического состава минералов на микрозонде CAMEBAX-MICRO, на электронном сканирующем микроскопе JSM-6510LV (Jeol Ltd) с энерго-дисперсионным спектрометром INCAEnergy350+.

Результаты: впервые детально изучен акцессорный магнетит алейско-змеиногорских гранитоидов, выделено две его генерации – титаномагнетит раннемагматический и магнетит постмагматический. Первый представлен структурой распада-окисления магнетит-ульвошпинелевой системы. Преобладают сидерофильные элементы-примеси – Mn, V, Mg, Cr, Ge, в меньшей степени литофилы Al, Si, Y, отсутствуют халькофильные элементы. Установлен генезис постмагматического магнетита – результат выщелачивания титаномагнетита магматогенными гидротермальными растворами с последующей кристаллизацией магнетита, который наследует химизм титаномагнетита, отличаясь низким содержанием или отсутствием Ti и других элементов-примесей. Впервые отмечена особенность поведения V – в магнетитах заключительных лейкогранитных фаз содержания V на порядок выше, чем в раннемагматическом титаномагнетите.

Выводы: особенности структуры распада, элементы-примеси титаномагнетита служат типоморфным признаком базальтоидной природы гранитоидов. Калиевая специфика щёлочности, повышенная кремнекислотность, активность летучих на заключительном этапе препятствовали накоплению V в титаномагнетите. Раннемагматический титаномагнетит – минерал-концентратор V, что отражает сингенетическую обогащённость расплава этим элементом и геохимическую специализацию алейско-змеиногорских гранитоидов на Fe, Ti, V, а также Y и PЗЭ.

Ключевые слова:

Рудный Алтай, гранитоиды, титаномагнетит, изоморфная система, структура распада, типоморфизм.

Постановка задачи

В пределах российской северо-западной части Рудного Алтая широко развиты гранитоидные тела, сосредоточенные в структурах Алейского поднятия, деформированные вулканогенными прогибами. Северную часть антиклинория занимает крупный, площадью более 1000 кв. км, Новонико-

лаевский плутон, имеющий сложную форму, удлиненную более чем на 60 км в субширотном направлении вдоль крупного Варшавского разлома. Южнее и на юго-западе его сменяют несколько меньшие по площади (около 300 км²) соответственно Алейский и Устьянский массивы. Названные три массива и ряд более мелких гранитоидных тел гео-

лого-стѐмочными работами, проведенными в последнее десятилетие ОАО «Горно-Алтайская экспедиция», объединены в полифазный и полиформационный алейско-змеиногорский магматический комплекс средне-верхнедевонского возраста [1–3]. В качестве петротипа комплекса принят полифазный Новониколаевский интрузив. Алейский и Устьянский массивы, ранее выделявшиеся в ранге одноимѐнных самостоятельных комплексов, представляются как единые с Новониколаевским индивидуализированные части крупного плутона батолитового типа, сформированного из одного магматического центра активизированной континентальной окраины в средне-позднедевонское время. По составу и геологическому положению комплекс рассматривается как типовое проявление тоналит-плагиогранит-лейкогранитовой формации окраинно-континентальных вулканоплутонических поясов, объединяющей черты тоналит-плагиогранит-гранодиоритовой и лейкогранитовой формаций [3].

Основная задача авторов – исследование закономерностей распределения широко распространѐнного в гранитоидных массивах комплекса акцессорного титаномагнетита, особенностей химического состава и строения его зѐрен, парагенетической ассоциации в гранитоидах различных фаз – производных длительно эволюционировавшего магматического расплава, с целью выявления дополнительных типоморфных признаков, позволяющих идентифицировать физико-химические условия формирования полифазного алейско-змеиногорского гранитоидного комплекса.

Петролого-геохимические особенности гранитоидов алейско-змеиногорского комплекса

Алейско-змеиногорский комплекс, петротипом которого является Новониколаевский гранитоидный плутон, включает породы четырёх интрузивных фаз (в порядке становления): 1 – габброиды и диоритоиды; 2 – тоналиты, кварцевые диориты, роговообманково-биотитовые плагиограниты; 3 – биотит-мусковит-роговообманковые лейкоплагиограниты; 4 – биотит-мусковитовые лейкограниты. Для пород комплекса не характерны гранодиориты и граниты. Наибольшую площадь плутона занимают гранитоиды второй, главной, фазы внедрения и лейкограниты заключительной. Типичные породы Алейского массива, сливающегося с Новониколаевским в центральной части Алейского поднятия, представлены тоналитами и плагиогранитами. Дифференциаты заключительной фазы внедрения слагают крупные штоки, в том числе Устьянский массив, занимающий юго-западную часть Новониколаевского плутона, и по своему петрографическому составу породы достаточно однородные с преимуществом распространением биотитовых и биотит-мусковитовых лейкогранитов.

Вычисленные температура кристаллизации породы по формуле Г.М. Беляева и В.А. Рудника [4], температура кристаллизации титаномагнетита и

фугитивность кислорода по методу А.Ф. Баддингтона и Д.Х. Линдслея [5, 6] приведены в табл. 1. Как следует из полученных значений, формирование гранитоидных массивов комплекса относится к достаточно высокотемпературным (750...900 °С), температура кристаллизации акцессорного титаномагнетита также находится в пределах 700...800 °С при значениях фугитивности кислорода $10^{-17,5}$... $10^{-13,5}$ атм.

Характерная особенность формирования пород комплекса – широко проявившийся в постмагматическую стадию щелочной аутометасоматоз с возрастающим трендом щѐлочности от дифференциатов ранних фаз к заключительным. По ряду геологических признаков устанавливается принадлежность гранитоидных тел рассматриваемого комплекса гипабиссальной фазии глубинности [1–3].

Таблица 1. Температуры (Т, °С) и фугитивность кислорода (f_{O_2}) формирования пород и титаномагнетита

Фаза	Порода (массив)	Т, °С		f_{O_2} , 10 ⁻ⁿ атм.
		порода	титаномагнетит	
2	Плагиогранит (Новониколаевский)	800	700	17,5
	Тоналит (Алейский)	800	800	13,8
3	Лейкоплагиогранит (Новониколаевский)	800	800	13,5
	Плагиогранит (Алейский)	750	700	17,5
4	Лейкогранит (Новониколаевский)	900	700	17,5
	Лейкогранит (Алейский)	850	700	17,5
	Лейкогранит (Устьянский)	900	750	14,0

Породы главной фазы отличаются повышенной натриевостью и соответственно преобладанием плагиоклаза над калиевым полевым шпатом. В породах последующих дифференциатов возрастает активность калия, и микроклин по отношению к плагиоклазу становится доминирующим в составе лейкогранитов, образует пертитовые вроски в олигоклазе и порфирировидные вкрапленники. Показатели щѐлочности пород (коэффициент агапайности K_a , простой щѐлочности $K_{щп}$) закономерно возрастают от пород главной фазы ($K_a=0,38$... $0,67$; $K_{щп}=1,39$... $2,40$) к заключительным ($K_a=0,87$... $0,90$; $K_{щп}=4,80$... $5,80$).

Ведущая ассоциация акцессорных минералов в гранитоидах главной и третьей фазы – титаномагнетит-ильменит-циркон-апатитовая, в лейкогранитах заключительной фазы сменяется на гематит-титаномагнетит мартитизированный-циркон-топаз-редкоземельную с Y, Ce, La.

Методика исследований

Методика отбора минералогических проб гранитоидов и последующая их обработка принята в соответствии с существующими рекомендациями

В.В. Ляховича [7], отличаясь весом исходного материала, который составлял 3...5 кг. Минералогические пробы габброидов и других разновидностей пород ранней первой фазы не изучались в виду их интенсивной проработки поздними метаморфическими и гидротермальными процессами. Все аналитические исследования выполнены в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Определение химического состава титаномагнетита проведено на микрозонде CAMEBAX-MICRO канд. хим. наук Л.Н. Поспеловой. Исследование строения зёрен титаномагнетита, закономерностей изменения химического состава по профилю отдельных его кристаллов проведено на электронном сканирующем микроскопе JSM-6510LV (Jeol Ltd) с энерго-дисперсионным спектрометром INCAEnergy 350+. Детально анализировался химический состав фаз структуры распада твёрдого раствора титаномагнетита, имеющиеся включения более ранних минералов, а также сингенетичных минералов, образующих с титаномагнетитом сростания. В работе использованы анализы не менее 85 зёрен титаномагнетита из пород различных гранитоидных фаз. Кроме титаномагнетита анализировались наиболее распространённые сопутствующие ему другие железо-титанистые оксиды – гематит, ильменит, рутил. Анализы выполнены мл. науч. сотр. М.В. Хлестовым при участии соавтора статьи К.Л. Новоселова

Результаты исследований и их обсуждение

Титаномагнетит относится к числу наиболее распространенных акцессорных минералов в гранитоидах рассматриваемого комплекса, характеризуется неравномерностью распределения по площади массива, как в породах главной фазы, так и в последующих дифференциатах, образуя варьирующие в широких пределах весовые количества. Наиболее высокие содержания его в тоналитах Алейского массива (более 5 кг/т) и в плагิโอгранитах главной фазы Новониколаевского с разбросом содержаний по площади массива от 650 г/т до 2 кг/т. В плагิโอгранитах и лейкоплагิโอгранитах последующих фаз внедрения концентрации титаномагнетита снижаются до 1...1,5 кг/т и наиболее низкие – в лейкократовых разновидностях пород заключительных инъекций (400...900 г/т).

Электронно-микроскопическими исследованиями выявлено две генерации магнетита, различающиеся строением зёрен, химическим составом, временем появления и парагенетической ассоциацией: 1) титаномагнетит раннемагматический, 2) магнетит постмагматический.

Титаномагнетит раннемагматический характеризуется гетерогенностью строения зёрен, проявляющейся во всех фазовых разновидностях гранитоидов комплекса, и обусловленной следующими факторами: включением раннемагматических минеральных фаз; структурой распада твёрдого раствора титаномагнетита; метасоматическими изменениями в постмагматическую стадию щелочного автометасоматоза.

Среди включений в рассматриваемом титаномагнетите наиболее обычны кристаллы фтороапатита (содержание F до 3,5 %), реже встречается циркон, как правило, концентрирующийся по периферии его зёрен, и часто содержит включения микрокристаллитов титаномагнетита. Тесная ассоциация с апатитом, цирконом свидетельствует о сингенетичности выделения титаномагнетита из расплава с раннемагматическими акцессориями в условиях высоких температур. Парагенетическая ассоциация титаномагнетита с оксидными раннемагматическими акцессориями – гематитом, рутилом, ильменитом – указывает на высокий кислородный потенциал кристаллизующегося расплава и обогащённость его Fe и Ti. Темноцветные породообразующие (высокотитанистая роговая обманка) выделяются позже титаномагнетита, слагают каймы вокруг его зёрен, выполняют в них трещинки. Выделение водосодержащих фемических породообразующих минералов в более позднюю магматическую стадию кристаллизации указывает на маловодность или «сухость» магматического расплава на ранних этапах его кристаллизации. О дефиците воды в магматическом расплаве свидетельствует также акцессорный раннемагматический титаносодержащий гранат уграндитового ряда, единичные кристаллы которого часто фиксируются в тоналитах главной фазы, и по данным [8] служит показателем «сухости» расплава.

Титаномагнетит представляет собой промежуточный член двухкомпонентного твёрдого раствора ульвошпинели и магнетита $[x\text{Fe}_2\text{TiO}_4 \cdot (1-x)\text{Fe}_3\text{O}_4]$, выделенного Д.М. Печерским, В.И. Багиным и др. [9] в титаномагнетитовую серию со шпинелевой структурой. На раннемагматической стадии в условиях высоких температуры и парциального давления кислорода имело место высокотемпературное окисление однородной титаномагнетитовой фазы с формированием структуры распада твёрдого раствора – обособление собственно титаномагнетитовой матрицы и железо-титанистых по составу фаз. Однако в породах различных дифференциатов рассматриваемого комплекса структура распада титаномагнетита несколько индивидуализируется своими особенностями строения и химизма.

Титаномагнетит плагิโอгранитов главной фазы Новониколаевского массива характеризуется субграфической структурой распада ильменита в форме тонких изогнутых пластинок, пятен размером до 8 μm , заметно уменьшающихся к периферии зерна (рис. 1). По составу выделения ильменита весьма близки к стехиометрии – $(\text{Fe}_{0,972}\text{Mn}_{0,102})_{1,074}\text{Ti}_{0,962}\text{O}_3$. Несколько иная структура распада в тоналитах Алейского массива, она представлена параллельно ориентированными в одном направлении вытянутыми ламелями, размером до 20×6 μm , с извилистыми, редко прямолинейными границами. В периферической части зерна рисунок структуры сменяется на тонкие прерывисто-шнуровидные обособления (рис. 2). Химический состав варьирует даже в пределах одной пластинки от ильменита до

рутила и ферритрутила с широким разбросом содержания Fe (7,5...24,3 %).

Структура распада титаномагнетита лейкоплагиогранитов Новониколаевского массива последующей 3-й фазы внедрения сформирована ферритрутилом с варьирующими содержаниями Ti (74,3...89,2 %) и Fe (7,0...19,6 %) и представлена параллельно удлинёнными тонкими ламелями, переходящими к краю матрицы в субмикроскопические и обильные обособления, занимающие около 90 % её площади (рис. 3). В лейкогранитах четвёртой, заключительной фазы Новониколаевского массива структура распада титаномагнетита имеет вид прерывистых и ориентированных по (111) пластинок ильменита переменного состава от ильменита, близкого к стехиометрии $(\text{Fe}_{1,092}\text{Mn}_{0,082})_{1,174}\text{Ti}_{0,913}\text{O}_3$ до ильменита с избытком Fe – гемоильменита $(\text{Fe}_{1,675}\text{Mn}_{0,046})_{1,721}\text{Ti}_{0,631}\text{O}_3$.

Таким образом, разброс содержания Fe и Ti, часто в пределах одной ламели, – общая особенность химического состава выделившихся фаз. Вариации степени окисленности титаномагнетита по данным [9] является характерным признаком его высокотемпературного окисления в условиях высокого парциального давления кислорода.

Картина раннемагматического окисления титаномагнетита осложняется проявившимся в постмагматическую стадию щелочным, существенно калиевой направленности, аутометасоматозом, который способствовал процессу мартитизации зёрен рассматриваемого минерала. В меньшей степени мартитизации подвергся титаномагнетит пород главной и третьей фаз Новониколаевского массива, в которых замещение титаномагнетита, как правило, начинается от периферии зерна в виде тонких гематитовых иголочек, ориентированных по (111), к его центру (рис. 4). В интенсивно калишпатизированных гранитоидах и породах заключительных фаз внедрения зёрна титаномагнетита часто нацело замещены гематитом с сохранившимися реликтами пластинок структур распада твёрдого раствора (рис. 5). Нередко мартитизация сопровождается формированием текстур «разъедания» (рис. 6) и выщелачиванием титаномагнетита с образованием ильменитовых сеток (рис. 7). Процесс «разъедания» начинается от края зерна, проникая по границам ламелей ильменита к внутренним участкам зерна титаномагнетита. П. Рамдор [10] подобное избирательное выщелачивание магнетита объясняет интенсивным окислением и воздействием на минерал гидротермальных растворов.

В лейкогранитах Устьянского массива широким распространением пользуются зёрна титаномагнетита, продукты окисления которого представлены гидрогематитом и гидрогетитом, нередко содержащими зёрна каолинита (рис. 8), и их совместное появление обязано экзогенному процессу.

В химическом составе титаномагнетитовой фазы структуры распада магнетит-ульвошпинелевого твёрдого раствора установлен довольно ограниченный набор элементов-примесей, преимуще-

ственно группы железа (Mn, V, Mg, Cr, Ge), элементы литофильной группы (Al, Si и Y) и полное отсутствие халькофильных (табл. 2). Элементы-сидерофилы, обладая кристаллохимическим сродством к Fe^{2+} и Fe^{3+} , образуют структурную примесь в титаномагнетите по схеме изовалентного или гетеровалентного изоморфизма [11–13].

Кристаллохимические формулы титаномагнетита, представленные средними значениями коэффициентов, и его минальный состав приведены в табл. 2, 3. Состав титаномагнетита характеризуется резким дефицитом катионов Fe^{2+} и близким к стехиометрии количеством катионов в позиции Fe^{3+} , что объясняется высокой степенью окисленности железа, контролируемой режимом кислорода.

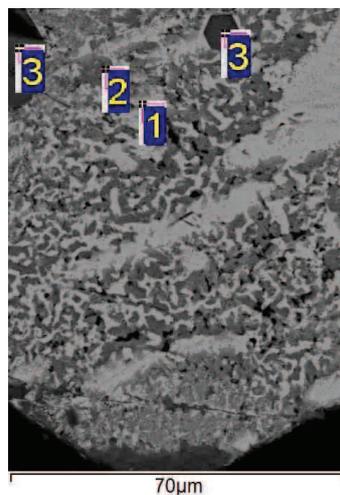


Рис. 1. Титаномагнетит (1) с субграфической структурой распада твёрдого раствора: 2 – ильменит; 3 – апатит. Плагиогранит, главная фаза, Новониколаевский массив. Здесь и на последующих рисунках – изображение в обратно рассеянных электронах

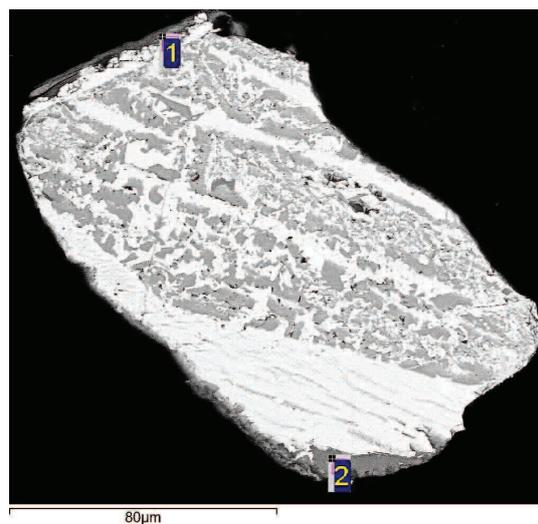


Рис. 2. Титаномагнетит (белое) с параллельно ориентированной структурой распада твёрдого раствора: темно-серое – ферритрутил; 1 – высокотитанистый амфибол; 2 – титанистый гранат. Тоналит, Алейский массив



Рис. 3. Структура распада твёрдого раствора титаномагнетита (2): 1 – феррирутил; 3, 4 – апатит; 5 – альбит. Лейкоплагиогранит, 3-я фаза, Новониколаевский массив



Рис. 6. Мартитизированный кристалл титаномагнетита с текстурой избирательного выщелачивания. Калишпатизированный плаггиогранит-порфир, главная фаза, Алейский массив



Рис. 4. Мартитизация титаномагнетита. Игольчатые агрегаты гематита развиваются по направлениям (111) титаномагнетита. Лейкогранит, 4-я фаза, Новониколаевский массив

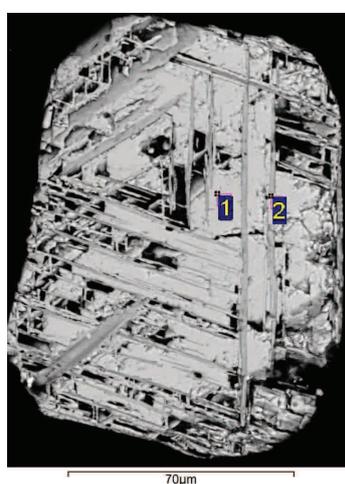


Рис. 7. Выщелачивание титаномагнетита (1) с формированием ильменитовой сетки (2). Лейкогранит, 4-я фаза, Новониколаевский массив

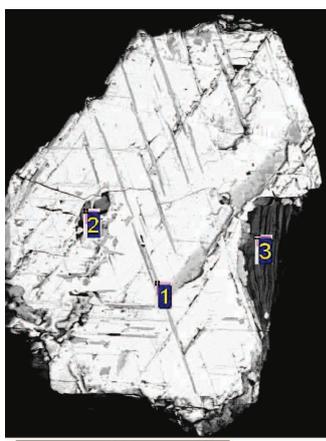


Рис. 5. Структура распада титаномагнетита: 1 – пластинки гемоильменита; 2 – включения фторapatита; 3 – биотит. Лейкогранит, 4-я фаза, Новониколаевский массив

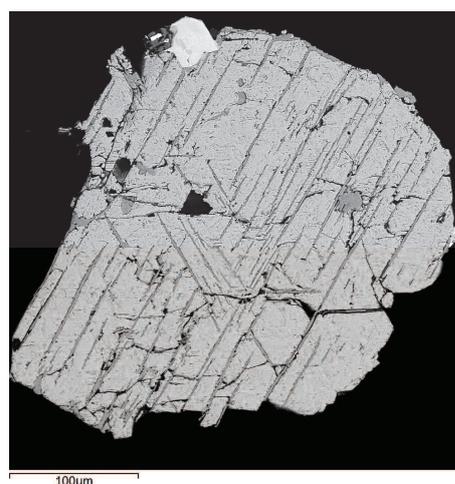


Рис. 8. Гидрогематит, заместивший титаномагнетит; просматривается структура распада ламелей гемоильменита, феррирутила по (111) титаномагнетита; по краю зерна вверху слева – включения циркона, монацита, апатита. Лейкогранит, 4-я фаза, Устьянский массив

Характерной особенностью химического состава титаномагнетита является разброс содержаний как главных минералообразующих элементов (Fe, Ti), так и примесных, особенно Mn, V, Cr. Вариации концентраций Fe и Ti нередко проявляются даже в пределах одного анализируемого зерна титаномагнетита. Величины отношений ульвошпинелевого и магнетитового миналов в титаномагнетите гранитоидов последовательных дифференциатов находятся в пределах 1:3...1:6 и регулируются режимом кислорода и, соответственно, степенью окисленности-распада магнетит-ульвошпинелевого твёрдого раствора. Однако не исключается и различный уровень насыщенности титаном магматического расплава. Так, на фоне довольно выдержанных средних содержаний Ti в титаномагнетите пород различных фаз (10...11 %), контрастно высокими концентрациями этого элемента выделяются титаномагнетиты тоналитов главной фазы Алейского массива и лейкоплагиограниты 3-й фазы Новониколаевского (средние содержания Ti соответственно 18,09 и 15,78 %). Минералого-петрографическими и электронно-микроскопическими исследованиями в алейских тоналитах в парагенетической ассоциации с титаномагнетитом установлены высокотитанистые амфибол, гранат (рис. 2), а также раннемагматические феррирутил, ильменит. Заметно пониженные содержания Ti в титаномагнетите плагиогранитной главной фазы Новониколаевского массива, видимо, отражают в целом обеднённость плагиогранитного дифференциата этим элементом, значительная часть которого вошла в одифференцированный габброидный расплав первой фазы внедрения. Имеющийся Ti в плагиогранитном расплаве на раннемагматиче-

ской стадии кристаллизации перераспределялся между сосуществующим с ним ильменитом. В лейкоплагиогранитном расплаве последующей третьей фазы внедрения имело место накопление Ti, что нашло отражение не только в резко возросшем количестве ульвошпинелевого минала в титаномагнетите, но и в повышенном содержании в лейкогранитах акцессорного ильменита.

Марганец в форме якобитового минала присутствует в титаномагнетите рассматриваемых гранитоидов постоянно, и в его распределении проявляется прямая связь с ульвошпинелевым миналом, особенно заметная в породах главной фазы и последующей лейкоплагиогранитной – марганцовистость титаномагнетита возрастает с ростом его титанистости (табл. 2, 3). Существование тесной геохимической связи между Ti и Mn в титаномагнетите отмечается рядом исследователей [14]. Однако в титаномагнетите заключительной лейкогранитной фазы Алейского и Устьянского массивов между содержаниями ульвошпинелевого и якобитового миналов проявляется обратное соотношение – с возрастанием в титаномагнетите ульвошпинелевого компонента (18,07...19,16 мол. %) резко понижается количество якобитового (до 0,2 мол. %) (табл. 3). Обеднённость Mn титаномагнетита плагиогранитов главной фазы Новониколаевского плутона и лейкогранитной заключительной фазы Устьянского массива (табл. 2) связано с перераспределением Mn в сосуществующих раннемагматических минералах. По данным электронно-микроскопических исследований кристаллы апатита, образующие включения в титаномагнетите, содержат Mn до 0,65 %, в ильмените концентрации Mn достигают 10 %, а в устьянских лейкогранитах, кроме ильменита, Mn в количестве

Таблица 2. Химический состав акцессорного титаномагнетита гранитоидов алейско-змеиногорского комплекса (мас. %)

Фаза	Порода (массив)	n	FeO _{общ.}	TiO ₂	MnO	V ₂ O ₃	MgO	Cr ₂ O ₃	GeO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Y ₂ O ₃
2	Плагиогранит (Новониколаевский)	7	81,79...82,64 82,76	9,01...11,0 10,01	0,03...0,11 0,06	0,30...0,49 0,39	0,01...0,02 0,01	0,01...0,04 0,02	0,02...0,09 0,03	–	–	0,02...0,03 0,02
	Тоналит (Алейский)	5	71,50...78,53 75,29	13,98...20,70 18,09	0,53...1,61 1,05	0,01...0,59 0,22	0,001...0,004 0,002	0,05...0,23 0,15	–	–	–	0,01...0,02 0,02
3	Лейкоплагиогранит (Новониколаевский)	6	73,57...76,75 74,78	14,66...17,81 15,78	1,07...1,42 1,24	0,46...0,66 0,54	0,003...0,005 0,004	–	–	–	–	0,02...0,03 0,02
	Плагиогранит (Алейский)	5	83,83...84,87 84,51	8,05...17,81 10,51	0,06...0,2 0,17	0,20...0,27 0,23	0,004...0,03 0,01	–	0,001...0,03 0,02	–	–	0,004...0,0 0,007
4	Лейкогранит (Новониколаевский)	6	73,41...87,91 80,1	5,82...14,85 10,34	0,05...0,5 0,22	0,07...0,08 0,076	0,01...0,021 0,013	–	0,01...0,08 0,05	–	–	0,02...0,02 4,0,02
	Лейкогранит (Алейский)	5	81,74...85,9 83,2	7,04...12,05 9,55	0,09...0,7 0,68	0,05...0,31 0,18	0,001...0,02 0,01	0,01...0,02 0,01	0,02...0,04 0,03	–	–	0,01...0,04 0,02
	Лейкогранит (Устьянский)	6	69,82...88,74 81,49	8,67...13,52 10,9	0,09...0,1 0,1	–	0,018...0,023 0,02	0,01...0,012 0,01	0,01...0,02 0,02	0,49...0,62 0,56	0,24...0,47 0,36	–

Примечание: n – число анализов; «–» – элемент не установлен; над чертой – минимальное – максимальное содержание элемента, под чертой – среднее.

Кристаллохимические формулы:

2-я фаза Плагиогранит (Новониколаевский) $(Fe_{0,847}Mn_{0,002}Mg_{0,001})_{0,85}(Fe_{1,708}Ti_{0,29}V_{0,0065}Cr_{0,0005}Ge_{0,0008})_{2,006}O_4$

Тоналит (Алейский) $(Fe_{0,732}Mn_{0,033}Mg_{0,0002}Ti_{0,765}(Fe_{1,477}Ti_{0,505}V_{0,009}Cr_{0,004}Li_{1,995})O_4$

3-я фаза Лейкоплагиогранит (Новониколаевский) $(Fe_{0,824}Mn_{0,017}Mg_{0,0008})_{0,842}(Fe_{1,66}Ti_{0,332}V_{0,013})_{2,005}O_4$

Плагиогранит (Алейский) $(Fe_{0,862}Mn_{0,003}Mg_{0,001}Li_{0,866}(Fe_{1,734}Ti_{0,268}V_{0,009}Ge_{0,0004})_{2,01}O_4$

4-я фаза Лейкогранит (Новониколаевский) $(Fe_{0,874}Mn_{0,007}Mg_{0,001}Li_{0,895}(Fe_{1,761}Ti_{0,201}Ge_{0,001}V_{0,001})_{1,964}O_4$

Лейкогранит (Алейский) $(Fe_{0,813}Mn_{0,002}Mg_{0,0008}Li_{0,816}(Fe_{1,64}Ti_{0,36}Cr_{0,003}V_{0,002}Ge_{0,0007})_{2,003}O_4$

Лейкогранит (Устьянский) $(Fe_{0,898}Mn_{0,003}Mg_{0,001}Li_{0,902}(Fe_{1,81}Ti_{0,115}Al_{0,06}Cr_{0,003}Ge_{0,0003}Li_{1,989})O_4$

до 0,5 % накапливается в породообразующих биотите, мусковите, а также в акцессорном диопсиде.

Ванадий в переменных количествах присутствует в титаномагнетите всех фазовых разновидностей пород за исключением лейкогранитов Устьянского массива, в титаномагнетите которых этот элемент не накапливается (табл. 2, 3). Наиболее обогащён V титаномагнетит главной плагиогранитной и последующей лейкоплагиогранитной фаз Новониколаевского плутона, в котором при незначительном разбросе частных содержаний средние содержания этого элемента составляют 0,39...0,54 %. Вариацией содержаний V выделяется титаномагнетит тоналитов Алейского массива (0,01...0,59 %). Титаномагнетит лейкогранитов заключительных фаз, особенно Новониколаевского массива, накапливает этот элемент в заметно меньших количествах (0,07...0,08 %). Закономерности распределения V в титаномагнетите пород последовательных фаз наиболее контрастно подчёркиваются средними величинами кульсонитового ми-

нала (табл. 3). Поведение V³⁺ в титаномагнетите определяется его тесной кристаллохимической связью с Fe³⁺, регулируемой режимом кислорода и кислотностью – щёлочностью расплава [15]. Так, высокими показателями фугитивности кислорода ($f_{O_2} = 10^{-13,8} \dots 10^{-13,5}$ атм.) характеризуются наиболее насыщенные ванадием титаномагнетиты алейских тоналитов главной фазы и лейкоплагиогранитов 3-й фазы Новониколаевского. Существенно окислительные условия, соответствующие обогащённости расплава Fe³⁺, служили благоприятным фактором для заполнения V³⁺ вакансии не только в структуре титаномагнетита, но и следуя за Fe³⁺, в раннемагматическом гематите (до 0,47 %). В заключительных лейкогранитных фазах Алейского и Новониколаевского массивов резкое понижение ванадиевости титаномагнетита связано с изменением физико-химических условий кристаллизации расплава – относительное понижение кислородного потенциала ($f_{O_2} = 10^{-17,5}$ атм.), возрастание щёлочности и активности летучих, особенно F, с

Таблица 3. Минимальный состав титаномагнетита (мол. %)

Фаза	Порода (массив)	Магнетит FeFe ₂ O ₄	Ульвошпигель Fe ₂ TiO ₄	Якобсит MnFe ₂ O ₄	Кульсонит FeV ₂ O ₄	Магнезиоферрит MgFe ₂ O ₄	Хромит FeCr ₂ O ₄	Герцинит FeAl ₂ O ₄
2	Плагиогранит (Новониколаевский)	84,49	14,91	0,2	0,3	0,07	0,04	–
	Тоналит (Алейский)	70,11	21,63	7,62	0,47	0,02	0,15	–
3	Лейкоплагиогранит (Новониколаевский)	72,97	22,32	3,98	0,66	0,07	–	–
	Плагиогранит (Алейский)	85,26	13,36	0,88	0,45	0,06	–	–
4	Лейкогранит (Новониколаевский)	83,86	15,07	0,98	0,05	0,04	–	–
	Лейкогранит (Алейский)	81,54	18,07	0,2	0,1	0,08	0,02	–
	Лейкогранит (Устьянский)	77,91	19,16	0,2	–	0,1	0,02	2,93

Таблица 4. Химический состав акцессорного магнетита гранитоидов алейско-змеиногорского комплекса (мас. %)

Фаза	Порода (массив)	n	FeO _{общ.}	TiO ₂	V ₂ O ₃	MnO	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
2	Плагиогранит (Новониколаевский)	6	<u>87,95...89,83</u> 89,53	<u>0,82...0,92</u> 0,87	–	–	–	–	–
	Тоналит (Алейский)	9	<u>92,72...93,91</u> 93,31	–	<u>0,22...0,28</u> 0,25	<u>0,32...0,45</u> 0,39	–	–	–
4	Лейкогранит (Новониколаевский)	10	<u>87,71...96,14</u> 92,07	<u>0,85...0,93</u> 0,89	<u>0,19...0,31</u> 0,23	–	<u>0,005...0,2</u> 0,10	–	<u>0,38...1,34</u> 0,95
	Лейкогранит (Алейский)	6	<u>90,6...93,63</u> 92,41	–	<u>0,19...0,31</u> 0,23	–	–	–	–
	Лейкогранит (Устьянский)	12	<u>86,53...93,19</u> 89,80	<u>0,22...1,01</u> 0,54	–	–	–	<u>0,24...1,56</u> 0,66	<u>0,28...0,49</u> 0,35

Примечание: n – число анализов; «–» – элемент не установлен; над чертой – минимальное – максимальное содержание компонента, под чертой – среднее.

Кристаллохимические формулы:

2-я фаза Плагиогранит (Новониколаевский) Fe_{0,969}(Fe_{1,952}Ti_{0,028})_{1,98}O₄

Тоналит (Алейский) (Fe_{0,985}Mn_{0,014})_{0,999}(Fe_{1,998}V_{0,003})_{2,001}O₄

4-я фаза Лейкогранит (Новониколаевский) Fe_{0,938}(Fe_{1,89}Al_{0,018}Cr_{0,002}V_{0,001}Ti_{0,025})_{1,936}O₄

Лейкогранит (Алейский) Fe_{0,993}(Fe_{2,001}V_{0,003})_{2,004}O₄

Лейкогранит (Устьянский) Fe_{0,94}(Fe_{1,912}Al_{0,064}Ti_{0,026})_{2,002}O₄

которым V в форме комплексного соединения $[VF_5]$ [15] способен мигрировать в остаточный расплав, что препятствует полному рассеянию V в раннемагматическом титаномагнетите. Отсутствие примеси V в титаномагнетите Устьянского массива и в целом низкие его содержания в лейкогранитах (20-кратное понижение относительно кларка) объясняется генетической принадлежностью его к типичным представителям гранитоидов А-типа [1]. Щелочная специализация лейкогранитного расплава, насыщенность его летучими служили неблагоприятными факторами для накопления V в титаномагнетите и других железосодержащих акцессорных и породообразующих минералах.

Примесь Mg в титаномагнетите гранитоидов рассматриваемых фаз присутствует постоянно и обычно его средние содержания составляют 0,01...0,02 %, за исключением алейских тоналитов главной фазы и лейкоплагиогранитов 3-й фазы Новониколаевского массива, в титаномагнетите которых количество Mg на порядок ниже (0,002...0,004 %). Хром накапливается в титаномагнетите пород главной фазы и преимущественно в тоналитах Алейского массива (0,05...0,23 %), в дифференциатах последующей 3-й фазы этот минерал не содержит Cr, однако проявляет тенденцию к его накоплению (до 0,02 %) в заключительной лейкогранитной фазе Алейского и Устьянского массивов. Германий относится к числу постоянно присутствующих примесей в титаномагнетите, за исключением алейских тоналитов и лейкоплагиогранитов Новониколаевского массива, титаномагнетит которых не содержит Ge (табл. 2). Однако в титаномагнетите следующей плагиогранитной фазы Алейского массива примесь Ge вновь появляется и вместе с Cr накапливается в титаномагнетите заключительных дифференциатов.

Присутствие литофильных глинозёма и кремнезёма установлено лишь в титаномагнетите лейкогранитов Устьянского массива (табл. 2). Способность Al_2O_3 растворяться в магнетите при высоких температурах (500...800 °C) доказана экспериментально [16]. Исследованиями В.А. Вахрушева [13] также отмечается возможность вхождения герцинита в структуру магнетита, однако при более высоких температуре и парциальном давлении кислорода. Накоплению герцинитового минала (до 2,93 мол. %) в структуре титаномагнетита Устьянского массива способствовали благоприятные физико-химические условия формирования лейкогранитной интрузии: 1) обогащённость расплава флюидом, содержащим F, Cl, P и другие летучие компоненты, обусловившим повышение температуры расплава (до 900 °C) и фугитивности кислорода ($f_{O_2}=10^{-14}$ атм.); 2) повышенная щелочность расплава и соответственно возросшая подвижность Al_2O_3 . В несколько меньших количествах в титаномагнетите содержится SiO_2 (0,24...0,47 %) и нахождение Si^{4+} обязано тесной кристаллохимической связи с Al^{3+} , следуя за которым, кремний формирует в минерале неструктурную примесь.

Иттрий, типично рассеянный элемент, тесно связанный с лантаноидами, образует стабильную примесь (0,01...0,04 %) в титаномагнетите гранитоидов Алейского и Новониколаевского массивов и отсутствует в этом минерале Устьянских лейкогранитов (табл. 2). Насыщенность лейкогранитного расплава летучими компонентами способствовала формированию в лейкогранитах Устьянского массива самостоятельных минеральных фаз – ксенотима, иттрофлюорита, монацита и других Y-содержащих редкоземельных акцессорных минералов, широко распространённых в породах Устьянского массива.

Таким образом, в составе раннемагматического титаномагнетита гранитоидного комплекса присутствуют элементы сидерофильной группы, что указывает на их генетическую принадлежность к дифференциатам базальтоидного первичного расплава, формирование которого обязано поступлению в область его генерации разогретых окислительных мантийных флюидов. Высокая активность кислорода поступающих флюидов, соответственно низкая подвижность серы, не способствовали накоплению халькофильных элементов в формирующемся базальтовом магматическом расплаве.

Накопление элементов-примесей в раннемагматическом титаномагнетите регулируется многими факторами, и прежде всего уровнем концентрации их в отдифференцированном гранитоидном расплаве, что хорошо прослеживается на распределении Cr, Ge, Mg в титаномагнетите гранитоидов различных фаз. Однако, как показывают исследования, к главным регуляторам накопления примесей относятся потенциал щёлочности расплава и активность летучих, особенно соединений F, зависимость от которых наглядно демонстрируется поведением V, Ti, Mn. Названные три элемента преимущественно накапливаются в титаномагнетите тоналитов и плагиогранитов с натриевой направленностью щёлочности ($Na_2O/K_2O=1,46...2,77$). По мере возрастания калиевоности в заключительных дифференциатах заметно снижается ванадиевость, титанистость и марганцовистость минерала. Повышенный потенциал калия в лейкогранитах Устьянского массива ($K_2O/Na_2O=1,24...1,46$) не способствовал концентрации V уже в области генерации остаточного лейкогранитного расплава.

Постоянное присутствие в рассеянной форме Y в титаномагнетите Алейского и Новониколаевского массивов, а в устьянских лейкогранитах в форме самостоятельных минералов Y и Y-содержащих редкоземельных минералов, видимо, является специфической особенностью химизма гранитоидных массивов и свидетельствует о повышенном потенциале Y и других лантаноидов в магматическом расплаве.

Магнетит по времени образования относится к заключительной постмагматической стадии формирования гранитоидных тел с участием магматогенных высокотемпературных (300...400 °C) гидро-

термальных растворов. Циркулирующие гидротермы производили выщелачивание раннемагматического титаномагнетита (рис. 7) с последующим формированием и отложением магнетита в остывающем гранитоидном теле. Наиболее активно гидротермальная деятельность проявилась в плагиогранит-тоналитовых интрузивах главной фазы и лейкогранитовых телах заключительных дифференциатов; в лейкоплагиогранитах третьей фазы постмагматический магнетит не установлен. В прозрачных шлифах новообразованный, по сути метасоматический, магнетит наблюдается в виде вытянутых цепочковидных агрегатов зёрен, выполняющих трещинки в породе, и нередко сопровождается хлоритом. В магнитной фракции минерал присутствует в обычных для него кристаллогранных формах {111} размером не более 0,2 мм, в отличие от раннемагматического титаномагнетита, грани не несут скульптуры роста и не затронуты процессом мартитизации.

Исследованием кристаллов магнетита микронзондовым и электронно-микроскопическими методами выявлено их однородное строение, без структуры распада и включений других фаз. По краю зёрен обычно наблюдается кайма железистого хлорита, по составу близкого к тюрингиту, нередко по трещинкам проникающего в минерал (рис. 9). Химический состав магнетита наследуется от раннемагматического титаномагнетита, отличаясь заметно низким содержанием Ti или его отсутствием и степенью очищенности от других примесных элементов. Вычисленные кристаллохимические формулы магнетита весьма близки к стехиометрии, особенно магнетиты пород Алейского массива (табл. 4).

Титан образует близкий уровень концентраций в магнетите рассматриваемых гранитоидов (0,54...0,87 %), за исключением магнетитов алейских пород, в которых примесь Ti не содержится, что объясняется нахождением в алейских гранитоидах гидротермального феррирутила. В составе магнетита отсутствуют примеси, характерные для раннемагматического титаномагнетита – Mg, Ge, Y, а также Mn, кроме магнетита алейских тоналитов, титаномагнетит которых также обогащён этим элементом. В магнетите лейкогранитной фазы Новониколаевского массива появляется примесь Cr и Al, не установленных в раннемагматическом титаномагнетите этих пород и указывает на накопление этих элементов в остаточном магматическом расплаве.

Примесь V в стабильных концентрациях (0,23...0,25 %) в магнетите рассматриваемых гранитоидных дифференциатов на порядок превышает количество этого элемента в раннемагматическом титаномагнетите заключительной лейкогранитной фазы. Отсутствие V в магнетите плагиогранитной фазы Новониколаевского интрузива, видимо, связано с неблагоприятными физико-химическими условиями для его вхождения в структуру магнетита. Способность V в постмагматическом

процессе проявлять литофильные свойства [15] не исключает его нахождение в постмагматических силикатах плагиогранитов (биотит, эпидот и др.) или миграцию в форме $[VF_3]$ в составе гидротермальных растворов за пределы интрузивного тела.

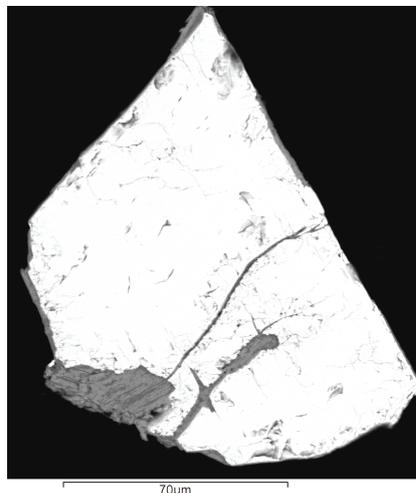


Рис. 9. Зерно магнетита (светлое), по краю зерна и по трещинкам – хлорит (серое). Лейкогранит, 4-я фаза, Новониколаевский массив

Исследованиями Н.А. Григорьевой [17] распределения V в минералах и породах верхней части континентальной коры магнетит (титаномагнетит) с содержанием $V \geq 0,2$ % относится к V-богатому магнетиту. По уровню накопления V две изученные генетические разновидности – раннемагматический титаномагнетит и метасоматический магнетит – превышают минимальные значения для V-богатого магнетита, что позволяет рассматривать эти минералы главными концентраторами и носителями V, определяющими положительную геохимическую специализацию на ванадий гранитоидов алейско-змеиногорского комплекса.

Выводы

1. В гранитоидах полифазного алейско-змеиногорского комплекса (D_{2-3}) установлены две генерации акцессорного магнетита, отличающиеся уровнем содержания элементов-примесей, условиями и временем образования – раннемагматический титаномагнетит и постмагматический магнетит. Наибольшие весовые количества в гранитоидах образует раннемагматический титаномагнетит.
2. Раннемагматический титаномагнетит представляет собой продукт распада магнетит-ульвошпинелевого твёрдого раствора в процессе высокотемпературного окисления на раннемагматическом этапе в условиях повышенного парциального давления кислорода и относительной маловодности расплава. Различная степень распада-окисления обусловила широкий разброс содержаний Fe, Ti, Mn в титаномагнетитовой фазе.

3. Элементы-примеси титаномагнетита, представленные сидерофильной группой (Mn, V, Mg, Ge, Cr) и постоянно ассоциирующим с ними Y, при отсутствии халькофильных, являются типоморфным признаком гранитоидов алейско-змеиногорского комплекса – производных сложно дифференцированного базальтоидного расплава.
4. Уровень накопления V в титаномагнетите регулируется щелочностью расплава, кремнекислотностью и активностью летучих (F, Cl, P, H₂O). Калиевая направленность щёлочности, повышенная кремнекислотность и возросшая активность летучих в заключительном лейкогранитном расплаве явились отрицательными факторами для концентрации V в титаномагнетите.
5. В процессе кристаллизации гранитоидов имело место связывание V в остаточном расплаве в комплексе [VF₅] с последующим его участием в магматогенных гидротермальных растворах и накоплением в постмагматическом магнетите гранитоидов, в том числе в лейкогранитах заключительной фазы.
6. Раннемагматический титаномагнетит выступает главным минералом-концентратором V, что отражает первичную сингенетическую обогащённость расплава этим элементом и геохимическую специализацию гранитоидов алейско-змеиногорского комплекса на Fe, Ti, V, а также Y и редкоземельные элементы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Новоселов К.Л., Туркин Ю.А. Девонский гранитоидный магматизм и геодинамические режимы его проявления в северо-западной части Рудного Алтая // Современные проблемы магматизма и метаморфизма: Матер. Всерос. конф., посвящённой 150-летию академика Левинсон-Лессинга и 100-летию профессора Г.М. Саранчиной. Т. 2. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2012. – С. 100–103.
3. Туркин Ю.А. Тоналит-плагиогранит-лейкогранитовая формация Рудного Алтая // Природные ресурсы Горного Алтая. – 2009. – № 2. – С. 70–79.
4. Ефремова С.В., Стафеев К.Г. Петрохимические методы исследования горных пород: справочное пособие. – М.: Недра, 1985. – 511 с.
5. Buddington A.F., Lindsley D.H. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents // Journal of Petrology. – 1964. – V. 5. – P. 2. – P. 310–357.
6. Buddington A.F., Fahey J., Vlisidis A. Degree of oxidation of Adirondack iron oxide and iron-titanium oxide minerals in relation to petrogeny // Journal of Petrology. – 1963. – V. 4. – P. 1. – P. 173.
7. Ляхович В.В. Рациональная методика извлечения акцессорных минералов из гранитоидов. – М.: Недра, 1966. – 48 с.
8. Файф Дж. Несколько мыслей о гранитных магмах // Механизм интрузий магмы. – М.: Мир, 1972. – С. 173–187.
9. Магнетизм и условия образования изверженных горных пород / Д.М. Печерский, В.И. Багин, С.Ю. Бродская, З.В. Шарпова. – М.: Наука, 1975. – С. 9–36.
10. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. – М.: ИЛ, 1962. – 1132 с.
11. Макаров Е.С. Изоморфизм атомов в кристаллах. – М.: Атомиздат, 1973. – 288 с.
12. Ляхович В.В. Акцессорные минералы (их генезис, состав, классификация и индикаторные признаки). – М.: Наука, 1968. – 273 с.
13. Вахрушев В.А. Рудные минералы изверженных и метаморфических пород: справочное пособие. – М.: Недра, 1988. – 199 с.
14. Рябчиков И.Д., Когарко Л.Н. Термодинамический анализ магнетит + титанит + клинопироксеновых равновесий в апатитоносной интрузии Хибинского щелочного комплекса // Щелочной магматизм, его источники и плюмы. Вып. 2: труды VII Междунар. семинара. – Иркутск–Неаполь, 2007. – Иркутск, 2007. – С. 38–47.
15. Борисенко Л.Ф. Ванадий (минералогия, геохимия и типы эндогенных месторождений). – М.: Недра, 1973. – 192 с.
16. Дымкин А.М., Пермяков А.А. Онтогенез магнетита (по материалам изучения природных руд и агломератов). – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. – 188 с.
17. Григорьев Н.А. Распределение ванадия в верхней части континентальной коры // Литосфера. – 2010. – № 4. – С. 142–151.

Поступила 12.12.2013 г.

ACCESSORY TITANOMAGNETITE TYPOMORPHISM OF DEVONIAN GRANITOIDS IN NORTH-WESTERN AREA OF RUDNI ALTAI

Konstantin L. Novoselov,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University.

Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: nkonstantin1@rambler.ru.

Yuriy A. Turkin,

Cand. Sc., Gorno-Altai Expedition Ltd.,

Russia, Altai Territory, 659370, Biysk region, Maloeniseskoe,
Sovetskaya street, 15. E-mail: jurtour@yandex.ru.

Research relevance consists in determining the demand in mineral geochemical investigation of potential granitoid ore-bearing complexes in Rudni Altai, embracing significant reserves of non-ferrous, noble and rare metals, which, in its turn, would expand the existing Russian mineral resources.

Research target is to identify the distinctive accessory titanomagnetite as typomorphism characteristics of potential ore-bearing polyphase Aleysky-Zmeinogorsk granitoid complexes.

Research methods in determining mineral chemical composition are: micro-sonde CAMEBAX-MICRO; electronic scanning microscope JSM-6510LV (Joel Ltd.) with energy-dispersive spectroscopy INCAEnergy350+.

Research results include the following: initial detailed investigation of accessory magnetite of Aleysky-Zmeinogorsk granitoids and identification of two generations – early-magnetic titanomagnetite and post-magnetic titanomagnetite. The first of which is the decomposition-oxidation of magnetite-ulvospinel structure system. The following siderophile inclusion elements are predominate – Mn, V, Mg, Cr, Ge, while lithophilic elements – Al, Si, Y are less and chalcophilic elements are absent. The post-magmatic magnetite genesis was determined, being the result of titanomagnetite leaching via magmatogene hydrothermal solutions and further crystallization of magnetite, which, in its turn, derives the chemical behavior of titanomagnetite itself. In this case it characterizes low content or absence of Ti and other inclusion elements. The characteristic of V behavior was noted – in the final leucogranite phases magnetite contains more V than in early-magnetic titanomagnetite.

Conclusion. Specific decomposition structure and titanomagnetite inclusion elements are typomorphic features of the basaltoid nature of granitoids. Specific potassic features of alkalinity, increased silica acidity and volatile activity during the final phase inhibit the possible V accumulation in titanomagnetite. Early-magnetic titanomagnetite is the mineral-concentrator V. This fact reflects the syngenetic enrichment of these melted elements and geochemical differentiation of Aleysky-Zmeinogorsk granitoids into Fe, Ti and V, as well as, Y and REE.

Key words:

Rudni Altai, granitoids, titanomagnetite, isomorphous system, decay structure, typomorphism.

REFERENCES

- Turkin Yu.A., Novoselov K.L. Petrologo-geokhimicheskie osobennosti devonskikh granitoidov severo-zapadnoy chasti Rudnogo Altaya [Petrological and geochemical features of Devonian granitoids in north-west part of Rudny Altai]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 5–15.
- Novoselov K.L., Turkin Yu.A. Devonskiy granitoidny magmatizm i geodinamicheskie rezhimy ego proyavleniya v severo-zapadnoy chasti Rudnogo Altaya [Devonian granitoid magmatism and geodynamic]. *Sovremennyye problemy magmatizma i metamorfizma. Materialy Vserossiyskoy konferentsii, posvyashchennoy 150-letiyu akademika Levinson-Lessinga i 100-letiyu professora G.M. Saranchinoy* [Current problems of magmatism and metamorphism. Proc. All-Russian conference devoted to 150 anniversary of academician Levinson-Lessing and 100 anniversary of professor G.M. Saranchina]. Saint-Petersburg, SPbGU Publ., 2012, vol. 2pp. 100–103.
- Turkin Yu.A. Tonalit-plagiogranit-leykogranitovaya formatsiya Rudnogo Altaya [Tonalite-plagiogranite-leucogranitic formation of Rudny Altai]. *Prirodnye resursy Gornogo Altaya*, 2009, no. 2, pp. 70–79.
- Efremova S.V., Stafeyev K.G. *Petrokhimicheskie metody issledovaniya gornykh porod: Spravochnoe posobie* [Petrochemical methods of rocks investigation]. Moscow, Nedra, 1985. 511 p.
- Buddington A.F., Lindsley D.H. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents. *Journal of Petrology*, 1964, vol. 5, p. 2, pp. 310–357.
- Buddington A.F., Fahey J., Vlisidis A. Degree of oxidation of Adirondack iron oxide and iron-titanium oxide minerals in relation to petrogeny. *Journal of Petrology*, 1963, vol. 4, p. 1, 173 p.
- Lyakhovich V.V. *Ratsionalnaya metodika izvlecheniya aktsessornykh mineralov iz granitoidov* [Rational methods of accessory minerals extraction from granitoids]. Moscow, Nedra, 1966. 48 p.
- Fayf Dzh. Neskolko mysley o granitnykh magmakh [A few thoughts about the granitic magmas]. *Mekhanizm intruziy magmy* [Mechanism of magma intrusions]. Moscow, Mir, 1972. pp. 173–187.
- Pecherskiy D.M., Bagin V.I., Brodskaya S.Yu., Sharapova Z.V. *Magnetizm i usloviya obrazovaniya izverzhennykh gornykh porod* [Igneous rocks magnetism and conditions of their formation]. Moscow, Nauka, 1975. pp. 9–36.
- Ramdor P. *Rudnye mineraly i ikh srastaniya* [Ore minerals and their intergrowth]. Moscow, IL Publ., 1962. 1132 p.
- Makarov E.S. *Izomorfizm atomov v kristallakh* [Isomorphism of atoms in crystals]. Moscow, Atomizdat, 1973. 288 p.
- Lyakhovich V.V. *Aktsessornye mineraly (ikh genesis, sostav, klassifikatsiya i indikatornye priznaki)* [Accessory minerals (their genesis, composition, classification and indicate signs)]. Moscow, Nauka, 1968. 273 p.

13. Vakhrushev V.A. *Rudnye mineraly izverzhennykh i metamorficheskikh porod: Spravochnoe posobie* [Ore minerals of igneous and metamorphic rocks: Manual]. Moscow, Nedra, 1988. 199 p.
14. Ryabchikov I.D., Kogarko L.N. Termodinamicheskiy analiz magnetit + titanit + klinopiroksenovykh ravnovesiy v apatitnosnoy intruzii Khibinskogo shchelochnogo kompleksa [Thermodynamic analysis of magnetite + titanite + clinopyroxene balance in apatiferous intrusion of Khibinsky alkaline complex]. *Shchelochnoy magmatizm, ego istochniki i plyumy. Trudy 7 Mezhdunarodnogo seminar* [Alkaline magmatism, its sources and plums. Transactions of 7th international seminar, Irkutsk – Napoli]. Irkutsk, 2007. Iss. 2, pp. 38–47.
15. Borisenko L.F. *Vanadiy (mineralogiya, geokhimiya i tipy endogennykh mestorozhdeniy)* [Vanadium (mineralogy, geochemistry and types of endogenic deposits)]. Moscow, Nedra, 1973. 192 p.
16. Dymkin A.M., Permyakov A.A. *Ontogeniya magnetita (po materialam izucheniya prirodnykh rud i aglomeratov)* [Magnetite ontogeny (by materials of nature ores and agglomerates investigations)]. Sverdlovsk, UNTS AN SSSR, 1984. 188 p.
17. Grigorev N.A. Raspredelenie vanadiya v verkhney chasty kontinentalnoy kory [Vanadium distribution in upper part of continental crust]. *Litosfera*, 2010, no. 4. pp. 142–151.