

СОСТАВ ИЛЬМЕНИТА И МАГНЕТИТА В РИТМИЧНО-РАССЛОЕННОМ АМФИБОЛОВОМ ГАББРО И АНОРТОЗИТАХ МЕДВЕДЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СРЕДНИЙ РИФЕЙ, ЮЖНЫЙ УРАЛ)

В. В. Холоднов, Е. С. Шагалов, Н. С. Бородина

Медведевский габбровый массив и одноименное месторождение по особенностям минерального состава пород и руд, РТ-условиям формирования и флюидному режиму отнесены к абиссальной группе массивов и месторождений, выделяемых в составе среднерифейского рифтогенного кусинско-копанского рудно-магматического комплекса [4, 5 и др.]. Для массивов и месторождений этой фациальной группы (Кусинского и Медведевского) характерно повышенное содержание в составе оруденения доли первично обособленного ильменита на фоне существенного снижения в сосуществующем титаномагнетите содержания TiO_2 (до 5–10 мас. % и менее). В малоглубинных массивах и месторождениях (Копанском и Маткальском) этого комплекса содержание TiO_2 в титаномагнетитах значительно выше (до 15 мас. % и более), при снижении в породах и рудах количества первично обособленного ильменита. Одновременно меняется и минеральный состав вмещающих оруденение габброидов, отражая их принадлежность к различным фациям глубинности. Вместе с тем, возраст всех этих разноглубинных массивов и месторождений – единый (1385–1395 млн. лет) – [6].

На карьере “Передовом” Медведевского месторождения в последние годы вскрыто несколько минеральных и генетических типов оруденения: главный тип – это магматические вкрапленные титаномагнетит-ильменитовые и массивные титаномагнетитовые руды (резко подчиненные по масштабам) в стратифицированных амфиболовых габброидах и в габбро-норитах и второстепенный – скарновомагнетитовый, связанный с ксенолитами в габброидах вмещающих скарнированных и мраморизованных карбонатных пород (доломитов) саткинской свиты. Распределение различных по минеральному составу магматических вкрапленных руд можно проследить в разрезе по врезке на юго-западном въезде на территорию карьера. Здесь в габброидах проявлена ритмично-полосчатая магматическая слоистость, где снизу вверх чередуются субгоризонтальные слои рудного мелано- и мезократового амфибол-сосюритового габбро с переменным содержанием титаномагнетита и ильменита (вплоть до густовкрапленных руд) и безрудные слои лейкогаббро и анортозитов. В одном из самых нижних макроритмов в рудоносных меланократовых габброидах проявляется более тонкая микроритмичность.

Здесь формируются микрослои мощностью от нескольких миллиметров до первых см, в которых меланократовые слои, обогащенные рудным компонентом, чередуются с лейкократовыми слоями с меньшим содержанием рудных, но с большим количеством плагиоклаза. Здесь же в лейкократовых прослоях появляются небольшие по размерам обособления и шлиры пегматоидного габбро. По составу эти шлиры близки к пегматоидному амфиболовому габбро, образующему ряд крупных обособленных тел в различных частях Медведевского месторождения, в том числе и вдоль его контактов с крупными ксенолитами доломитов саткинской свиты.

С целью изучения состава и условий образования одного из главных типов магматического вкрапленного титаномагнетит-ильменитового оруденения, развитого в ритмично-расслоенных породах, на микроанализаторе Cameca SX100 в ИГГ УрО РАН проведено детальное изучение состава ильменита и магнетита (аналитики Д.А. Замятин и В.Г. Гмыра). Химический состав пород и руд в исследованном ритмично-расслоенном разрезе показан в табл. 1, в которой расположение проб (слева направо) отражает их позицию (сверху вниз) в данном вертикальном разрезе: верхний ритм представлен пробами КС-717 и КС-719, следующий ниже железящий ритм пробами от КС-720 до КС-724 и нижний ритм пробами КС-725 и КС-729.

По литературным данным, в магматических породах разного состава и генезиса (от кимберлитов до базитов и гранитов) **ильменит** образуется на разных этапах их кристаллизации, в широком диапазоне термодинамических (РТ) и физико-химических параметров. Это определяет широкие вариации его химического состава [1, 2 и др.], которые могут быть использованы при определении его петрогенетической принадлежности, выяснения условий образования пород, роли процессов кристаллизационной дифференции и фракционирования и даже в некоторых случаях (кимберлиты) производить оценку перспективности алмазного оруденения. С позиции кристаллохимии в составе ильменита резко проявлен изовалентный изоморфизм между **Mg, Mn и Fe, а также гетеровалентный изоморфизм по схеме $3Fe^{2+} - 2Fe^{3+}$ или по схеме $Fe^{2+}_{1-x} Fe^{3+}_{2x} Ti_{1-x} O_3$** , где x -количество атомов Fe^{3+} заместивших атомы Fe^{2+} и Ti^{4+} . В связи с этим, ильменит имеет варьирующий состав в пределах мина-

Таблица 1. Химический состав пород и руд ритмично-расслоенного разреза

№ обр.	KC-717 верх	KC-718**	KC-719	KC-720	KC-721	KC-722	KC-723	KC-724	KC-725	KC-729 низ
SiO ₂	35.17	25.00	21.10	50.41	51.12	41.80	35.57	40.59	48.07	39.48
Al ₂ O ₃	10.26	9.98	7.36	20.09	20.18	8.78	9.33	9.42	17.81	10.27
TiO ₂	8.76	13.28	15.36	1.50	1.99	5.01	9.38	4.33	2.67	6.84
Fe ₂ O ₃ *	34.00	42.00	48.00	10.25	9.18	24.64	29.00	28.00	13.50	29.00
MgO	5.38	5.97	4.90	2.53	2.08	5.84	5.70	5.29	3.41	5.18
MnO	0.21	0.23	0.26	0.10	0.098	0.18	0.22	0.17	0.12	0.19
CaO	6.06	3.71	3.05	9.68	10.05	10.51	9.57	9.78	8.95	7.73
Na ₂ O	0.46	0.00	0.16	2.85	2.89	0.80	0.69	0.62	2.66	0.77
K ₂ O	0.49	0.23	0.05	0.04	0.03	0.55	0.58	0.46	0.06	0.46
P ₂ O ₅	0.15	0.13	0.05	0.62	0.53	0.38	0.19	0.24	0.25	0.32
ППП	0.80	1.00	0.00	1.80	1.40	1.20	0.20	0.90	1.60	0.30
Сумма	101.74	101.54	100.34	99.87	99.56	99.69	100.44	99.81	99.08	100.54

Примечание. * – Fe₂O₃ общее, ** – рудный габбро-норит; Na₂O по данным ICP-MS.

Таблица 2. Состав ильменитов ритмично-расслоенного разреза Медведевского массива.

	I	II	III	I	II	III	I	II	III
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TiO ₂	49.76	50.48	51.00	48.5	50.13	50.69	51.05	50.62	51.05
Al ₂ O ₃	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.03	0.01	0.06
FeO*	49.39	49.18	45.23	50.22	49.00	48.19	47.02	48.14	46.43
MnO	1.04	1.15	1.19	0.99	1.15	1.44	1.09	1.17	1.22
MgO	0.11	0.12	0.04	0.12	0.08	0.05	0.12	0.12	0.08
Na ₂ O	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.02
Cr ₂ O ₃	0.06	0.00	0.04	0.00	0.00	0.04	0.00	0.15	0.12
V ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.07	0.00
сумма	100.39	100.99	97.53	99.84	100.36	100.46	99.50	100.30	98.99

Примечание. Ильмениты: I – раннемагматические, II – позднемагматические, III – постмагматические. 1–3 – рудное амфиболовое меланогаббро (KC-717), 4–6 – лейкократовое амфиболовое габбро (KC-770–4), 7–9 – сосюритизированный анортозит (KC-721). FeO* – железо общее.

лов FeTiO₃ (собственно ильменит)– Fe₂O₃ (гематит), что и определяет вариации в содержаниях титана и суммарного железа. При высоких термодинамических параметрах (при высоких температурах и высокой фугитивности кислорода) возможен изоморфизм Al, Cr и V с Fe³⁺.

Состав ильменита в стратифицированном разрезе Медведевского месторождения непостоянен и варьирует в заметных пределах (табл. 2). Здесь, в сравнении с ильменитами других петрогенетических типов [1, 2], собственно ильменитовый компонент в составе минерала является определяющим. Известно, что для пород основного состава (габбро, базальтов, анортозитов) характерен, в целом, железистый ильменит с несколько повышенным содержанием MnO. Существенно более марганцевые ильмениты образуются в породах кислого состава, а в пегматитах, например, содержание MnO в ильмените достигает 6–7 вес. %. В базитах, как и в гранитоидах, содержание марганца в ильмените согласуется с индексом дифференциации, при наиболее высоких содержаниях марганца в самых поздних его генерациях.

Данные табл. 2 свидетельствуют, что как ранне-, так и позднемагматический ильменит в рудном меланогаббро из исследованного стратифици-

рованного разреза содержат много больше FeO* (до 50%), чем постмагматическая его генерация. Примечательна форма выделений раннемагматического ильменита. Это значительное количество округлых (каплевидных) выделений различного размера, заключенных в агрегат из крупных зерен зонального амфибола и сосюритизированного плагиоклаза. Это кумулюсный ильменит, который наиболее богат MgO (0.11–0.20%) и имеет минимальные содержания MnO и TiO₂. В центральной части таких образований видны тонкие структуры распада (рис. 1а) с выделением многочисленных пластинок гематита и магнетита (к-726 и др.). В краевых зонах структуры распада не образуются, здесь содержание железа и магния заметно понижается, а марганца и титана увеличивается. Высокое содержание FeO* определяется тем, что высокотемпературный кумулюсный ильменит образует серию твердых растворов с гематитом (гемоильменит) или низкотитанистым магнетитом (магнетоильменит). Ранее на наличие фазы магнетита в структурах распада ильменита из данного месторождения впервые обратил внимание В.Г. Фоминых, который одним из первых отнес данные ильмениты к магнетоильменитам. Магнетоильмениты, по его данным, характеризуются повышенным содержанием трехвалентного железа.

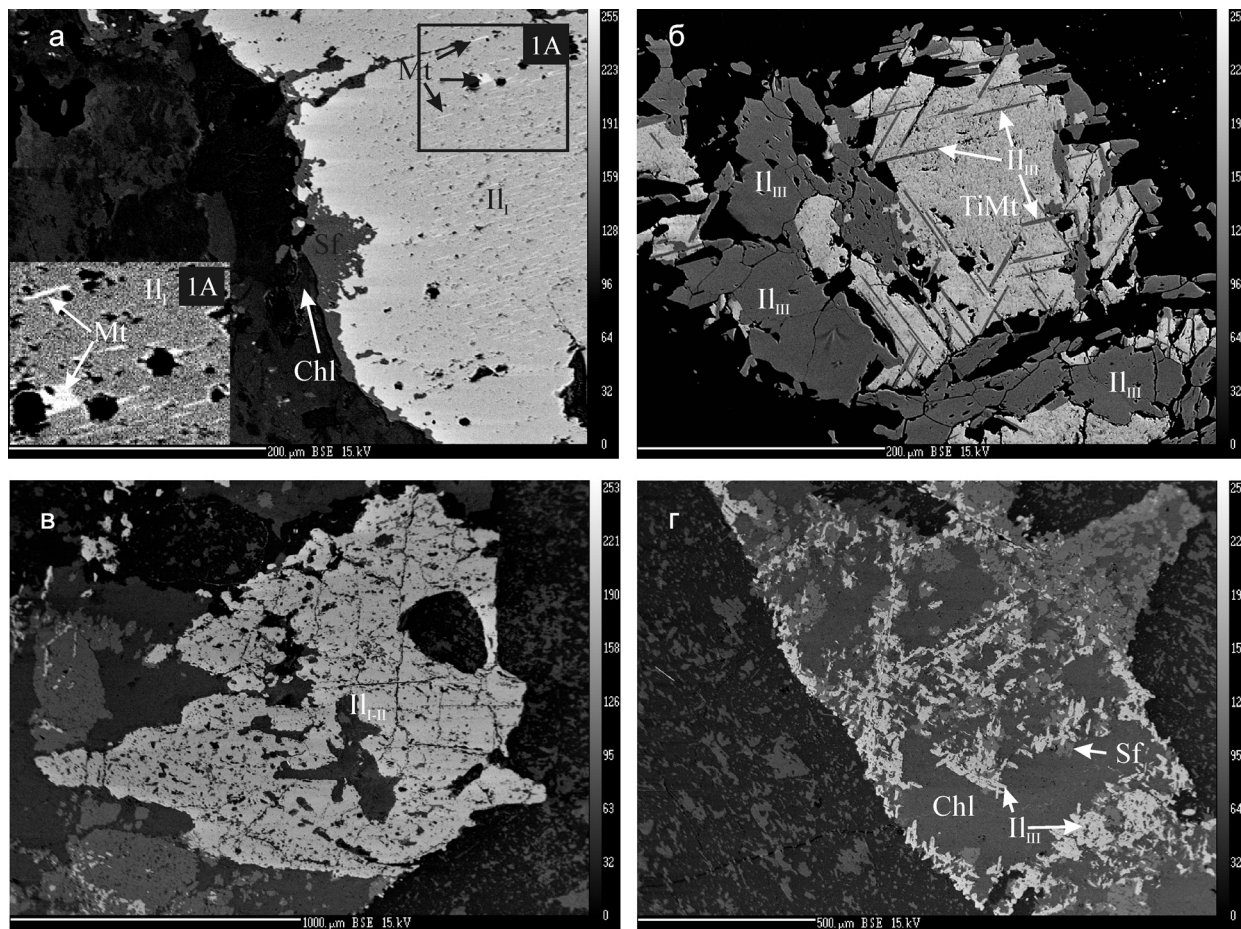


Рис. 1. Различные генерации ильменита и титаномагнетита в породах Медведевского массива.

а: ранний кумулюсный ильменит со структурой распада в его центре (КС-726), 1А – увеличенный фрагмент обведенный рамкой; по краям этот ильменит в виде тонкой каймы замещается сфеном и хлоритом, сфен по трещинкам проникает и внутрь кристаллов ильменита.

б: крупные неправильной формы сегрегации позднего ильменита III, образующиеся по краям зерен зонального со структурой распада титаномагнетита (КС-717); магнетит в центральной зоне без структур распада, она выделяется более темным цветом, содержит 13.3% TiO_2 , в промежуточной зоне со структурой распада – 9.4% TiO_2 , в краю, где не видны структуры распада – 6.7%.

в: сидеронитовый ильменит в анортозите, в виде крупных обособленных, но корродированных его выделений в интерстициях среди хлорита, сфена и альбита.

г: ильменит в анортозите (КС-721) в виде поздних сегрегаций из мелких пластинчатых его зерен в тесном срастании их со сфеном и высокожелезистым и высокоглиноземистым хлоритом.

Фото в отраженных электронах.

В меланогаббро с густовкрапленным оруденением наиболее широко развит позднемагматический “интеркумулясный” ильменит в виде крупных удлиненных выделений, образующий в рудах сидеронитовые структуры. Этот ильменит зонален по составу и содержит включения амфибола и сфена. Его состав: в центре – $\text{FeO}^* = 51.5\%$, $\text{MgO} = 0.14\%$, $\text{MnO} = 1.15\text{--}1.25\%$, при содержании $\text{TiO}_2 = 47\%$, в краю – $\text{FeO}^* = 49\%$, $\text{MgO} = 0.07\%$, $\text{MnO} = 1.30\%$, при содержании $\text{TiO}_2 = 49.5\%$, то есть в краевой зоне происходит рост содержаний марганца и титана, при спаде железа и магния. В центральной зоне этот “интеркумулясный” ильменит по составу близок раннему кумулюсному ильмениту охарактеризованному выше. В рудном меланогаббро позднемаг-

матический ильменит развит по периферии крупных зональных зерен амфибола, в которых содержание глинозема и железа нарастает от центра к периферии: Al_2O_3 – от 2–3% до 11–12%, FeO^* – от 15 до 21% и более, при снижении содержаний MgO от 13–14% до 7% (кс-717). В каждом из таких зональных зерен амфибола его состав от центра к краю последовательно меняется от бедного глиноземом более магнезиального амфибола (уралита) – в центре до ферроэденита и ферропаргасита в краях.

В постмагматическом ильмените в меланократовом рудном габбро происходит существенное снижение содержаний FeO^* (до 45%) и MgO до 0.04% и рост концентраций MnO до 1.20% и более и TiO_2 до 51%. Такой поздний ильменит в густов-

крапленных рудах образует сеть неправильных по форме сегрегаций и прожилков, состоящих из тонкозернистого ильменита в сростании с мелкошуйчатым высокожелезистым и высокоглиноземистым хлоритом. Данные рис. 1б свидетельствуют, что поздний сегрегационный ильменит образуется на постмагматическом этапе в процессе распада раннего высокотитанистого магнетита, первичное содержание TiO_2 в котором достигает 13 вес %. В этом случае ильменит образует поздние сегрегации по краям зерен высокотемпературного зонального титаномагнетита, а также отдельные рассекающие его прожилки. Такой сегрегационный ильменит имеет следующий состав: $FeO^* = 44.0\%$, $MgO = 0.03\%$, $MnO = 1.30\%$, при содержании $TiO_2 = 51.5\%$, что в точности соответствует составу пластинок ильменита в структурах распада первичного высокотитанистого магнетита.

В лейкократовых слоях, чередующихся с рудным меланогаббро в составе микроритмов, раннемагматический “кумулясный” ильменит представлен только единичными округлыми зёрнами по составу аналогичными (табл. 2) более обильному раннемагматическому ильмениту в рудном меланогаббро. В составе позднемагматического ильменита содержание FeO , MgO , MnO и TiO_2 является также близким составу позднемагматического “интеркумулясного” ильменита в стратифицированном рудном меланогаббро. Постмагматический ильменит при низких содержаниях MgO (около 0.05%) выделяется здесь высокими содержаниями MnO (1.44%), но при повышенных содержаниях и FeO^* (48%).

В крупных пластах анортозитов, перекрывающих ритмично-расслоенное рудное габбро, ильменит по составу имеет ряд особенностей (табл. 2), что указывает на его кристаллизацию при относительно пониженной температуре. Ранние генерации имеют здесь пониженное содержание FeO^* (47–48%), на фоне высокого содержания TiO_2 (50–51%). В то же время, содержания MnO и MgO соответствуют ранним генерациям ильменита в нижележащих расслоенных рудоносных габброидах. На фото (рис. 1в) показана ранняя генерация сидеронитового ильменита в анортозитах, в виде крупных обособленных, но корродированных выделений, находящихся в интерстициях между крупными идиоморфными зёрнами сосюритизированного плагиоклаза среди тонкозернистой массы высокожелезистого и высокоглиноземистого хлорита, сфена и альбита. Амфибол в данном анортозите отсутствует. На фото (рис. 1г) видно, что значительная масса ильменита в анортозите (кс-721) образует также и сегрегации из мелких пластинчатых зерен в тесном сростании их со сфеном и высокожелезистым и высокоглиноземистым хлоритом.

Титаномагнетит, как и ильменит, в исследованном ритмично-расслоенном разрезе представлен рядом генераций, различающихся по составу.

Ранний магнетит наиболее богат титаном, содержание которого в нераспавшихся фазах достигает 13 вес % TiO_2 . В распавшихся фазах с обильными вростками ильменита и шпинели, содержание титана в матрице позднего магнетита резко падает, содержание TiO_2 снижается до 3% и менее. Одновременно в магнетите нарастает количество ванадия: от 0.3% в наиболее раннем магнетите до 0.5% V_2O_5 в позднем распавшемся. С учетом того факта, что при наличии свободного ильменита в породах и рудах содержание титана в титаномагнетите определяется температурой [3, 8], можно на основе полученных аналитических данных определить начальную температуру формирования вкрапленного титаномагнетит-ильменитового оруденения в меланократовых ритмично-расслоенных породах, которая определяется значением около 1000°C, а распад твердых растворов в этих минералах с образованием позднего сегрегационного ильменита и бедного титаном магнетита происходил при температуре 500–600°C.

Таким образом, наличие роста содержаний рудных минералов в нижних частях макро- и микроритмов указывает на возможность ранней кумуляции ильменита и титаномагнетита в наиболее меланократовых породах отдельных ритмов. Эти высокотемпературные кумульные минералы имеют особый состав, отличный от позднемагматических и постмагматических генераций. Ранний высокотитанистый титаномагнетит беден многими несовместимыми и легкоплавкими элементами-примесями [7], а раннемагматический кумульный ильменит характеризуется наиболее высокими содержаниями Fe и Mg , при минимальных содержаниях Mn и Ti . Магний и железо относятся к наиболее тугоплавким катионам в составе исследованных ильменитов, их содержание и соотношение с содержаниями Mn и Ti характеризует эволюцию состава ильменита в процессе формирования ритмично-расслоенной серии пород, а также характеризует термодинамические и физико-химические условия петро- и рудогенеза. С понижением температуры состав ильменита меняется в направлении роста Mn -компоненты по схеме $Fe(Mg)TiO_3 - MnTiO_3$.

Кумуляция титаномагнетита и ильменита предшествовала окончательной кристаллизации меланократовых пород, с образованием крупных масс позднемагматического сидеронитового ильменита и титаномагнетита. Определенное практическое значение может иметь и образование постмагматического сегрегационного ильменита, что происходит в процессе распада первичного высокотитанистого титаномагнетита при температурах 500–600°C.

Полученные данные подтверждают также направленную кристаллизацию пород в исследованных макро- и микроритмах снизу вверх- от более высокотемпературных парагенезисов, формирую-

щих ритмично-расслоенные породы с густоокрашенным титаномагнетит-ильменитовым оруденением к относительно более низкотемпературным анортозитам, отражая эволюцию состава остаточного расплава в сторону накопления в нем более легкоплавких элементов и фтора [7].

Работа выполнена при финансовой поддержке программ ОНЗ РАН № 2, № 8 и № 10 (проект 09-Т-5-1019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багдасаров Э.А. Сравнительная характеристика состава ильменитов изверженных пород // ВМО. 1986. Ч. СХV. Вып. 2. С. 155–165.
2. Багдасаров Э.А. Типохимические особенности кристаллохимических параметров ильменитов и их прикладное значение // Региональная геология и металлогения, № 44, 2010. С. 34–41.
3. Полтавец Ю.А. Обсуждение титаномагнетитового геотермометра Баддингтона-Линдсли на основе сравнительного анализа равновесий шпинелидов магнетитовой серии // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1975. № 67. С. 63–72.
4. Феритатер Г.Б., Холоднов В.В. Бородин Н.С. Условия формирования и генезис рифейских ильменит-титаномагнетитовых месторождений Урала // Геол. рудн. месторожд. 2001. Т. 43, № 2. С. 112–128.
5. Холоднов В.В., Феритатер Г.Б., Бородин Н.С. и др. Гранитоидный магматизм зоны сочленения Урала и Восточно-Европейской платформы (Южный Урал) // Литосфера. 2006. № 3. С. 3–27.
6. Холоднов В.В., Феритатер Г.Б., Ронкин Ю.Л. и др. Sm-Nd-, Rb-Sr- возраст габброидов, гранитоидов и титаномагнетитовых руд из расслоенных интрузий Кусинско-Копанского комплекса (Южный Урал) // Докл. АН. 2010. Том 432, № 5. С. 650–654.
7. Холоднов В.В., Шагалов Е.С., Бочарникова Т.Д. Новые данные о составе и генезисе Fe-Ti-V руд Медведевского месторождения (Кусинско-Копанский рудно-магматический комплекс, Южный Урал) // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: мат-лы 8-й Межрегион. н.-п. конф. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. С. 159–161.
8. Buddington A.F., Lindsley D.H. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents // J.Petrol., 1964. Vol. 5. № 2. P. 310–357.