

## РЕДКОЗЕМЕЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ЭГИРИНОВЫХ МЕТАСОМАТИТАХ МИХАЙЛОВСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, КУРСКАЯ МАГНИТНАЯ АНОМАЛИЯ

Н.В.Грановская,  
Ю.В.Попов

Южный федеральный университет,  
г. Ростов-на-Дону

*В щелочных метасоматитах Михайловского железорудного месторождения установлен неодим-лантан-цериевый монацит в ассоциациях с эгирином, магнетитом, гематитом, магнезиально-железистыми карбонатами, кварцем, селадонитом, баритом. Эгириновое замещение железистых кварцитов приурочено к крупным разломам, сопряженным с линейными зонами окисления и жильным окварцеванием. Интерес к эгириновым метасоматитам Курской магнитной аномалии обусловлен их возможной связью с редкометальным и радиоактивным оруденением по аналогии с Криворожским железорудным бассейном.*

*Ключевые слова: редкоземельные минералы, эгирин, щелочные метасоматиты, железистые кварциты, Михайловское железорудное месторождение, Курская магнитная аномалия.*

В докембрийских полосчатых железисто-кремнистых формациях часто встречаются породы, обогащенные щелочными пироксенами и амфиболами. Наиболее широко они распространены в палеопротерозойских железорудных бассейнах Хамерсли (Западная Австралия), Трансвааль (ЮАР), Курской магнитной аномалии (Россия) и в Криворожском (Украина) [2, 13, 23, 24, 27]. Породы содержат эгирин, рибекит, иногда альбит, а также железомagneзиальные карбонаты, кварц, слюды, магнетит, гематит. Их генезис может быть связан с метасоматозом или ретроградным низкотемпературным метаморфизмом, когда натрий привносится флюидами в систему изначально бедную щелочами [1, 3, 12, 24, 27]. Это доказывается наличием реакционных структур замещения в железистых кварцитах, локальным развитием железистых пород со щелочными силикатами и их приуроченностью к тектоническим зонам. Существует

также гипотеза происхождения эгириновых и рибекитовых железистых кварцитов за счет изохимического метаморфизма осадочных пород, формирующихся из железосиликатных гелей эвапоритовых обстановок [20, 22]. Ограничением является большая редкость первично-натровых осадочных пород, при метаморфизме которых образуются полосчатые железистые формации.

Интерес к метасоматически измененным железистым кварцитам обусловлен их частой связью с благородным, редкометальным и радиоактивным оруденением. Так, в щелочных метасоматитах кремнисто-железистой формации Украинского щита открыты промышленные скопления Sc, V, U, отмечены повышенные содержания Sr, Ba, Zr, P, Ge, Au, Ag, Pt, лантаноидов [6, 15, 18, 19]. Главный минерал-концентратор Sc и V на Желтореченском, Первомайском, Анновском месторождениях Криворожского бассей-

на – эгирин, образованный при участии углекисло-натровых метасоматических растворов [6, 15].

Настоящая статья посвящена исследованию минералов эгириновых метасоматитов одного из крупнейших железорудных объектов Курской магнитной аномалии – Михайловского месторождения. На нем в разные годы анализировались гидротермально-метасоматические изменения докембрийских пород в связи с оценкой благороднометалльного оруденения в железистых кварцитах и техногенных продуктах переработки железных руд. При проведении глубинного геологического картирования данной территории (Н.В.Попкова и др., 2006 г.), а также исследовательских работ [8–10, 16, 17] были оконтурены зоны метасоматитов и дана их прогнозно-геохимическая оценка на Au, Pd, Pt, которые рассматриваются как попутные и техногенные полезные ископаемые. Но целенаправленно редкометалльная минерализация здесь не изучалась. Однако по аналогии с Криворожским железорудным бассейном в щелочных метасоматитах Михайловского месторождения могут присутствовать малоизученные редкие металлы, в том числе редкоземельные элементы (REE), представляющие промышленную ценность. Редкоземельные элементы – La, Ce, Nd, Y и др. – незаменимы в современных высокотехнологических производствах, поэтому поиски их месторождений и нетрадиционных источников относятся к актуальным и приоритетным направлениям геологических работ во всех развитых странах.

Для анализа отобраны образцы эгириновых пород из обнажений на горизонте 0 в юго-восточной части Центрального карьера Михайловского рудника. Прозрачные и полированные шлифы изучались методами оптической микроскопии. Электронно-зондовые исследования выполнены в Центре коллективного пользования научным оборудованием «Центр исследований минерального сырья и состояния окружающей среды» Южного федерального университета с применением растрового электронного микроскопа VEGA II LMU (фирмы TESCAN), систем энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT и волнодисперсионного микроанализа INCA WAVE 700 (фирмы OXFORD Instruments Analytical).

Михайловское месторождение, расположенное в Курской области Центральной России, обладает уникальными запасами железных руд. Железорудная толща относится к протерозойской железисто-кремнисто-сланцевой формации нижнего карелия (курской серии) [5]. Раннепротерозойские железорудные толщи, слагающие объект, претерпели региональный метаморфизм зеленосланцевой фации [4, 11], в результате которого сформировались основные минеральные парагенезисы. Месторождение находится на западном крыле Михайловской грабен-синклинали, и его складчатая структура осложнена элементами разрывной тектоники главным образом соскладчатого характера.

Железные руды представлены неокисленными железистыми кварцитами (магнетитовыми, гематит-магнетитовыми, магнетит-гематитовыми), а также продуктами зон окисления и древних кор выветривания (окисленными гематитовыми кварцитами и богатыми гематит-мартитовыми рудами). Основным объектом добычи – неокисленные железистые кварциты с содержанием магнитного Fe не менее 16% и общего Fe ~34–40%. Окисленные кварциты с содержанием Fe 40–41,5% относятся к труднообогатимым рудам и не эксплуатируются. Окисленные железистые кварциты залегают на неокисленных кварцитах, перекрывая их полностью на всей площади месторождения в виде линейно-площадных тел сложной формы мощностью от 20–60 до 200–300 м. Вдоль тектонических разломов линейные зоны окисления опускаются на глубину до 400 м и более [5, 7].

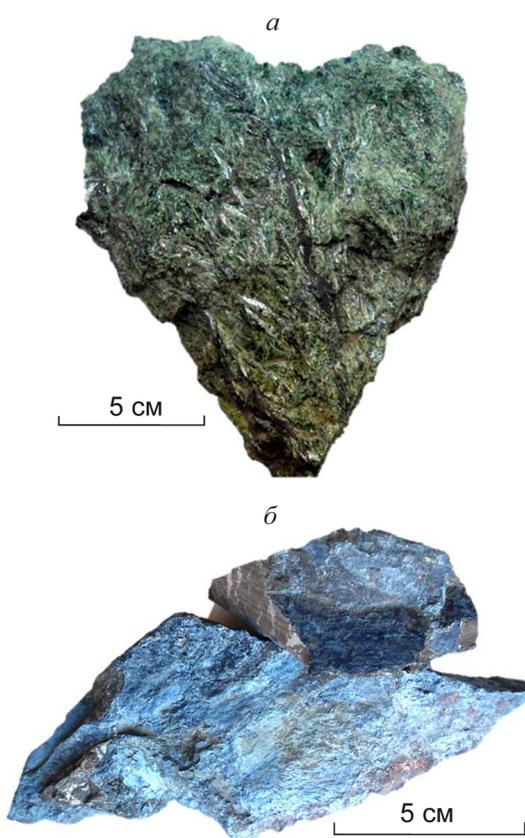
Богатые руды (с содержанием Fe >45%) залегают на «головах» железистых кварцитов в верхней части профиля коры выветривания. Их тела плащеобразной формы мощностью обычно не более 20–30 м. Они образуются за счет выщелачивания, выноса кремнезема, разложения алюмосиликатов и мартитизации магнетита, что характерно для большинства крупных месторождений в докембрийских полосчатых железистых формациях [21, 25].

Метаморфогенные полосчатые руды месторождения впоследствии были изменены метасоматическими и гидротермальными процессами, которые наиболее интенсивно проявля-

ны в зонах разрывной тектоники и рассланцевания, сопряженных с линейными зонами окисления [8]. На юге, юго-востоке и в центре Центрального карьера Михайловского рудника среди метасоматитов, приуроченных к крупным разломам, встречаются зеленые эгириновые разности. Эгириновые тела обособлены в виде гнезд и жил, мощностью в среднем ~0,6 м, протяженностью более десятков метров. Линейные зоны эгиринизации могут прослеживаться на сотни метров при мощности в десятки метров. Попутно с эгирином в зонах метасоматоза отмечается синий рибекит, который часто развивается по трещинам, плоскостям плитчатости в карбонатизированных железистых кварцитах (рис. 1). В целом процесс рибекитизации на Михайловском месторождении полигенный, выходит за рамки узколокальных тектонических зон, так как рибекит присутствует также в слабодислоцированной толще железистых кварцитов.

*Минеральные ассоциации эгириновых метасоматитов.* Изученные зеленые метасоматиты представлены преимущественно щелочным пироксеном (>90%) с минералами поздних стадий, среди которых преобладают карбонаты, магнетит и кварц. В качестве редких минералов наблюдаются селадонит, монацит, барит. Основная масса щелочных метасоматитов сложена агрегатами эгирина – шестоватыми, спутанно-волокнистыми, сноповидными с длиной индивидов до 2–3 см.

При микроскопических исследованиях шлифов, помимо крупных шестоватых кристаллов эгирина (>1 мм), в основной массе породы фиксируются более мелкие призматические кристаллы эгирина (размером 0,1–0,3 мм и менее) в зазубренных гранобластовых, нематобластовых сростаниях. По трещинам спайности в эгирине развиваются цепочки изометричных кристаллов магнетита и вытянутые метазерна кварца с коррозионными границами (рис. 2). По результатам микрозондового анализа определен состав щелочного пироксена, слагающего основную массу образца, который отвечает стандартному составу эгирина, вес. %: 14,1 Na<sub>2</sub>O, 34,1 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 51,2 SiO<sub>2</sub>; отмечается присутствие магния (Mg ~0,04±0,07).



**Рис. 1. Щелочные метасоматиты Михайловского месторождения:**

*а* – зеленый эгириновый метасоматит; *б* – рибекит в виде синих примазок по трещинам в карбонатизированных гематит-магнетитовых кварцитах

Как видно на электронных снимках, магнетит и кварц являются более поздними минералами щелочного метасоматоза, так как образуют линейно вытянутые метазернистые выделения в эгирине. Крупные зерна магнетита размером 0,1–2 мм, их контуры часто зазубрены, местами в магнетите встречаются участки с повышенным содержанием Na, Si за счет реликтов замещающегося эгирина. Мелкие зерна оксидов железа (50–5 мкм) представлены идиоморфными изометричными метакристаллами, образующими цепочки по субпараллельным трещинам в эгирине. В отдельных фрагментах микрокристаллы магнетита пересекают границы кварцевых выделений, что дает основание предположить следующую последовательность минералообразования: эгирин → кварц → магнетит.

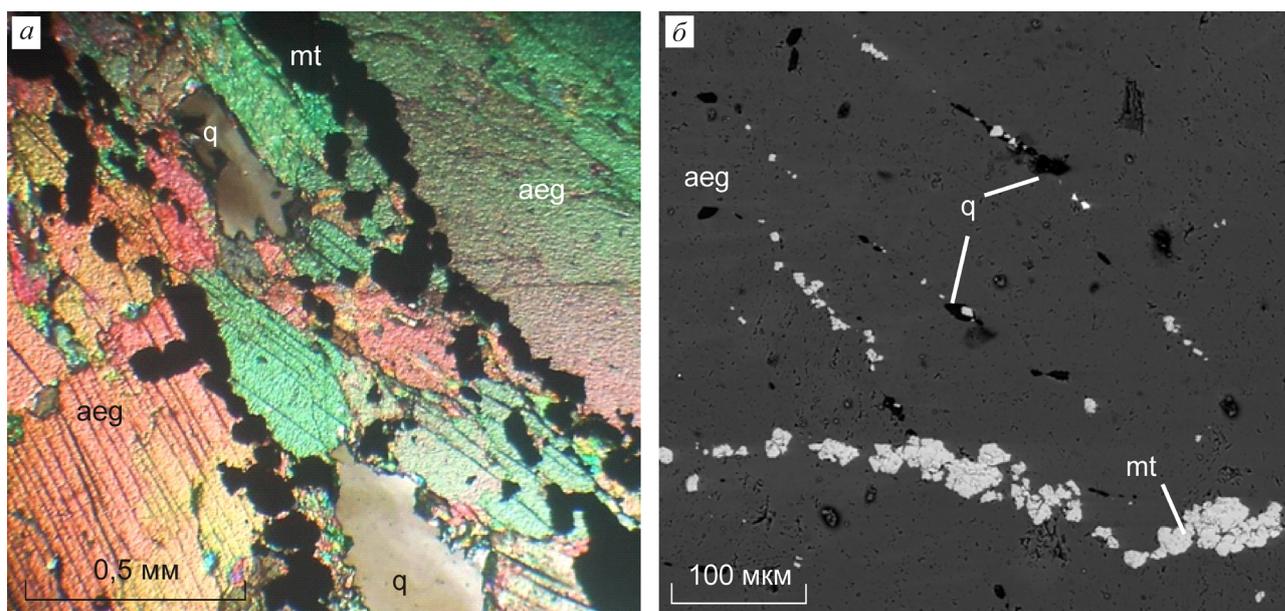


Рис. 2. Цепочки метакристаллов магнетита (mt) и метазерна кварца (q) по трещинам спайности в эгиристине (aeg):

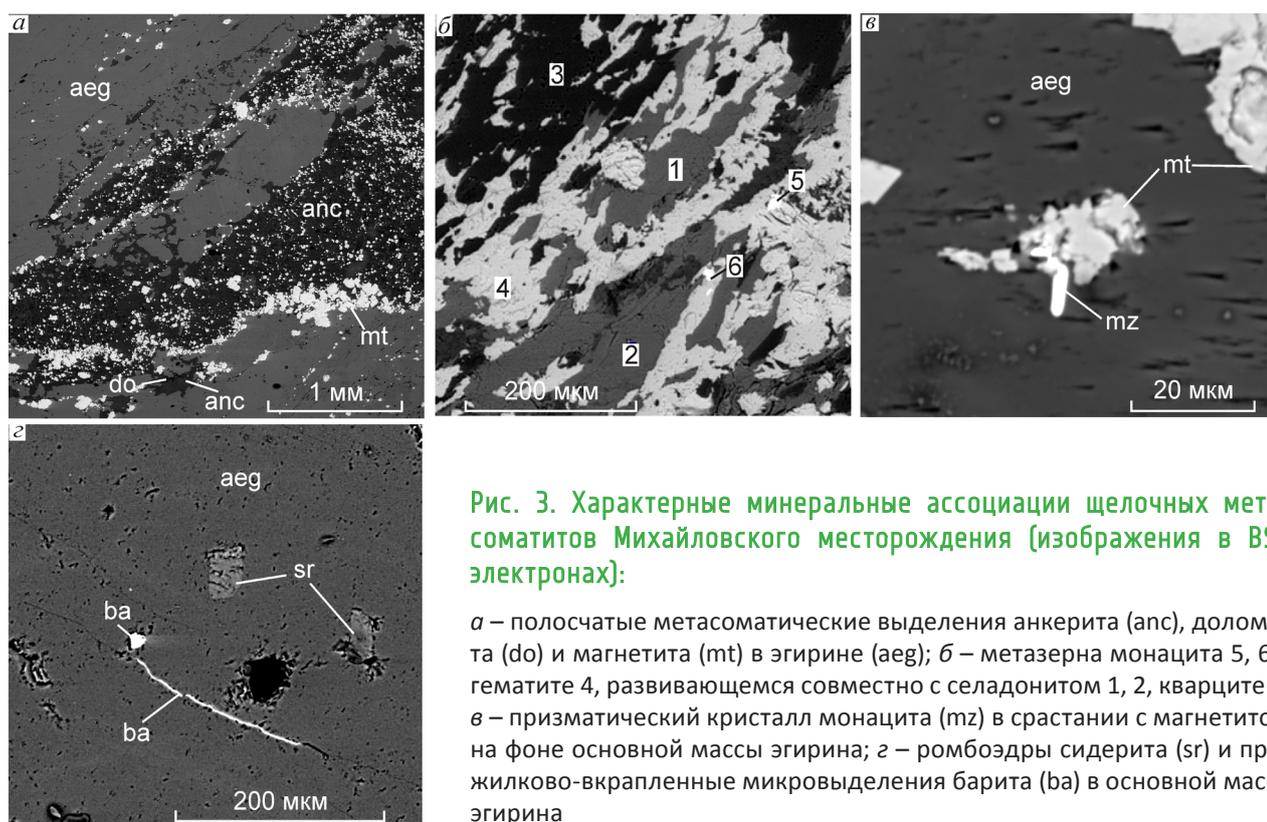
а – фото шлифа (никили скрещены); б – изображение в BSE электронах

Микрозондовые исследования показали также наличие в эгириновых породах нескольких генераций карбонатов. Наиболее ранний карбонат представлен сидеритом (с усредненным составом  $(\text{Fe}_{0,8}\text{Mg}_{0,2})\text{CO}_3$ ) в виде редких зерен и ромбоэдрических кристаллов совместно с эгирином (рис. 3, г).

На рис. 3, а демонстрируется общий вид микростроения щелочного метасоматита с магнезиально-железистыми карбонатами. В основной массе эгирина локализованы извилисто-полосчатые невыдержанные выделения карбонатов, к которым приурочены пятнистые скопления и цепочки метакристаллов магнетита. Коррозионные извилистые границы карбонатных выделений, расположение вдоль микротрещин свидетельствуют об их более позднем образовании по отношению к эгирину. Изометричные метакристаллы магнетита размером от 1 до 10 мкм и их цепочки пересекают полосчатые выделения карбонатов. В массе метасоматических карбонатов наиболее широко развит анкерит состава  $\text{Ca}(\text{Fe}_{0,7}\text{Mg}_{0,3})(\text{CO}_3)_2$ . В анкерите просматриваются более поздние метазерна доломита, отвечающие составу

$\text{Ca}(\text{Mg}_{0,8}\text{Fe}_{0,2})(\text{CO}_3)_2$ , которые, вероятно, находятся в парагенезисе с метакристаллами новообразованного магнетита. Последовательный вынос железа в ходе метасоматических преобразований карбонатов компенсируется его осаждением на поздних стадиях в виде оксида железа.

Минералогические исследования щелочных метасоматитов имеют не только научный, но и практический интерес, так как в сростаниях с новообразованными оксидами железа в этих породах обнаружен фосфат редкоземельных элементов – неодим-лантан-цериевый монацит. В зеленых эгириновых породах (см. рис. 1, а) монацит представлен хорошо ограниченными призматическими кристаллами размером до 10–20 мкм в парагенезисе с новообразованным поздним магнетитом (см. рис. 3, в). Фосфат редкоземельных элементов встречается и в карбонатизированных гематит-магнетитовых кварцитах с ребекитом (см. рис. 1, б), которые, как и эгириновые метасоматиты, локализуются в тектонических зонах. Монацит здесь образует метазерна в гематите, ассоциирующем с зеленой слюдой – селадонитом (см. рис. 3, б) и железистым доломитом. По данным микрозондовых ис-



**Рис. 3. Характерные минеральные ассоциации щелочных метасоматитов Михайловского месторождения (изображения в BSE электронах):**

*а* – полосчатые метасоматические выделения анкерита (anc), доломита (do) и магнетита (mt) в эгирине (aeg); *б* – метазерна монацита 5, 6 в гематите 4, развивающемся совместно с селадонитом 1, 2, кварците 3; *в* – призматический кристалл монацита (mz) в сростании с магнетитом на фоне основной массы эгирина; *з* – ромбоэдры сидерита (sr) и прожилково-вкрапленные микровыделения барита (ba) в основной массе эгирина

следований монацит соответствует составу (La-Ce) с Nd:  $(\text{Ce}_{0,5}\text{La}_{0,3-0,4}\text{Nd}_{0,1-0,2})(\text{PO}_4)$ ; содержание La 19,8±0,43 вес. %, Ce 25,2±0,4%, Nd 9,5±0,45%.

При проведении ГГК-50 докембрия на площади Михайловского месторождения (Н.В.Попкова, Е.А.Адамов, 2006 г.) было установлено, что зеленые магнезиально-калийно-железистые слюды возникли после щелочных пироксенов и амфиболов, но до последующей субщелочной стадии, которая фиксируется карбонатами. Это подтверждается и нашими данными. С заключительными фазами субщелочной стадии связано также образование монацита. Учитывая особенности поведения редкоземельных элементов в щелочно-карбонатных растворах при температурах >300°C [14, 26], можно предположить, что калий способствует переносу элементов цериевой группы, а натрий их осаждению. Уменьшение в гидротермальных растворах калия вследствие связывания его в слюды способствовало осаждению REE цериевой группы.

К поздним генерациям эгириновых метасоматитов, помимо карбонатов, кварца, магне-

тита и монацита, относится барит состава  $(\text{Ba}_{0,94}\text{Sr}_{0,06})\text{SO}_4 - (\text{Ba}_{0,93}\text{Sr}_{0,05}\text{Ca}_{0,02})\text{SO}_4$  с количеством Sr 2,1± 0,21 вес. %. Барит, содержащий повышенные концентрации Sr, встречен в эгирине в виде мелких метазерен размером первые десятки микрометров и ультрамикроскопических прожилков (см. рис. 3, з).

Итак, наиболее ранние минералы эгириновых пород – эгирин и небольшое количество сидерита. Все новообразованные минералы в эгириновых метасоматитах (анкерит, доломит, кварц, магнетит, монацит, барит) приурочены к субпараллельным микротрещинным зонам в эгирине. Но основная масса анкерита, в свою очередь, пересекается, замещается выделениями более поздних доломита, магнетита, неодим-лантан-цериевого монацита, стронцийсодержащего барита. Общий процесс последовательности образования минералов изученных щелочных метасоматитов можно представить в виде следующих схем:

гематит-магнетитовый кварцит → эгирин → кварц → магнетит;

магнетитовый кварцит → гематит+селадонит → ферродоломит → монацит;  
эгирин+сидерит → анкерит → доломит+магнетит;

эгирин → магнетит+монацит;

эгирин → барит.

На основании выполненных исследований можно сделать такие выводы:

неодим-лантан-цериевый монацит обнаружен в составе эгириновых и карбонатных метасоматитов, развивающихся в тектонических зонах по железистым кварцитам Михайловского месторождения;

в ассоциациях с монацитом, кроме эгирина, присутствуют карбонаты изоморфного ряда анкерит – доломит, селадонит, магнетит, гематит, кварц, стронцийсодержащий барит, которые развиваются в результате неоднократных последовательных реакций замещения с привносом и выносом Na, Ca, Mg, K, SiO<sub>2</sub>, Fe, P, REE;

редкоземельная минерализация совместно с новообразованным магнетитом и баритом относится к заключительным фазам поздней субщелочной стадии щелочного метасоматоза;

REE, P, Ba, судя по структурно-морфологическим взаимоотношениям новообразованных минералов, привносились в тектонически ослабленные зоны гидротермальными растворами метаморфогенной или плутоногенной природы;

эгириновые метасоматиты Курской магнитной аномалии могут быть связаны с редкометальным и радиоактивным оруденением по аналогии с Криворожским железорудным бассейном.

*Авторы благодарны главному геологу Рудоуправления Михайловского ГОКа Н.И.Ломаче и ведущему геологу С.М.Мастерову в содействии при отборе проб и предоставлении геологического материала.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Глаголев А.А.* Метаморфизм докембрийских пород КМА. – М.: Наука, 1966.
2. *Евтехов В.Д.* Генетическая и прикладная минералогия натриевых метасоматитов железисто-кремнистых формаций Украинского щита: Автореф. дис... д-ра геол.-минер. наук. – Львов, 1992.
3. *Елисеев Н.А., Никольский А.П., Кушев В.Г.* Метасоматиты Криворожского рудного пояса. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1961.
4. *Жданов В.В.* Железорудные скарны и железистые кварциты // Отечественная геология. 1993. № 4. С. 25–32.
5. *Железные руды КМА / Под ред. В.П.Орлова, И.А.Шевырева, Н.А.Соколова.* – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2001.
6. *Желтореченское ванадий-скандиевое месторождение / А.В.Тарханов, А.Р.Кудлаев, А.В.Петрин и др.* // Геология рудных месторождений. 1991. № 6. С. 50–56.
7. *Жмакин В.М.* Рудоносность Михайловского района Курской Магнитной Аномалии // Разведка и охрана недр. 1998. № 9–10. С. 31–34.
8. *Кашин С.В., Плющев Е.В., Попкова Н.В.* Стадийность и зональность эпигенетического минералообразования в железистых кварцитах Михайловского месторождения (КМА) // Зап. ВМО. 2001. № 6. С. 95–98.
9. *Мызников И.К., Шелехов А.Н.* Технологическая оценка отвальных хвостов магнитной сепарации железистых кварцитов КМА для организации попутной золотодобычи // Тез. докл. 2-го Междунар. симпозиума «Проблема комплексного использования руд». СПб., 1996. С. 76.
10. *Попкова Н.В.* Золотоносность докембрийских образований Михайловского рудного узла (КМА): Автореф. дис... канд. геол.-минер. наук. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2003.
11. *Региональные метаморфо-метасоматические формации / В.В.Жданов, Г.М.Беляев, Б.А.Блюман и др.* – М.: Недра, 1983.
12. *Савко К.А., Поскрякова М.В.* Минералогия, фазовые равновесия и условия метаморфизма пород Шемраевского железорудного месторождения Курской магнитной аномалии // Вестн. Воронеж. ун-та. Геология. 2004. № 1. С. 68–83.
13. *Савко К.А., Поскрякова М.В.* Рибекит-эгирин-селадонитовые железистые кварциты Михайловского железорудного месторождения Курской магнитной аномалии: фазовые равновесия и условия метаморфизма // Петрология. 2003. Т. 11. № 5. С. 471–490.
14. *Синькова Л.А.* О миграции и разделении ЕЗЭ в щелочно-карбонатной среде // Геохимия гидротермального рудообразования. М., 1971. С. 154–161.

15. Харитонов В.Н. Этапность формирования комплексных скандий-ванадий-железных руд Первомайского месторождения Кривбасса // Разработка рудных месторождений. 1997. № 61. С. 143–145.
16. Чернышов Н.М., Молотков С.П., Петров С.В., Попкова Н.В. Особенности распределения и формы нахождения платиноидов и золота в железистых кварцитах Михайловского месторождения КМА // Изв. вузов. Геология и разведка. 2003. № 5. С. 24–30.
17. Шелехов А.Н. Золото- и платиноносность железистых кварцитов Русской платформы и пути их практического использования в XXI веке // Руды и металлы. 1999. № 1. С. 123–125.
18. Каталенець А.І. Про розподіл ванадію в рідкіснometальних натрієвих метасоматитах залізо-кременистих формацій Українського щита // Геолого-мінералогічний вісник. 2001. № 2. С. 93–96.
19. Мядзель В.В. Стадійність гіпергенних змін егірину з Криворізького басейну // Геолого-мінералогічний вісник Криворізький технічний університет. 2003. № 1. С. 64–67.
20. French B.M. Mineral assemblages in diagenetic and low-grade metamorphic iron formations // Econ. Geol. 1973. Vol. 68. P. 1063–1074.
21. Gutzmer J., Chisonga B.C., Beukes N.J. and Mukhopadhyay J. The geochemistry of banded iron formation-hosted high-grade hematite-martite iron ores // Reviews in Econ. Geol. 2008. Vol. 15. P. 157–183.
22. Klein C. Greenalite, minnesotaite, crocidolite and carbonates in a very low-grade metamorphic Precambrian iron formation // Canad. Miner. 1974. Vol. 12. P. 475–498.
23. Miyano T., Beukes N.J. Mineralogy and petrology of the contact metamorphosed amphibole asbestos-bearing Penge iron formation, Eastern Transvaal, South Africa // J. Petrol. 1997. Vol. 38. № 5. P. 651–676.
24. Miyano T., Klein C. Conditions of riebeckite formation in the iron-formation of the Dales Gorge Member, Hamersley Group, Western Australia // Amer. Mineral. 1983. Vol. 68. P. 517–529.
25. Roy Subrata, Venkatesh A.S. Mineralogy and geochemistry of banded iron formation and iron ores from eastern India with implications on their genesis // J. Earth Syst. Sci. 2009. 118. № 6. P. 619–641.
26. Smith M.P., Henderson P., Peishan Z. Reaction relationships in the Bayan Obo Fe-REE-Nb deposit Inner Mongolia, China: implications for the relative stability of rare-earth element phosphates and fluorocarbonates // Contrib. Miner. Petrol. 1999. Vol. 134. P. 294–310.
27. Trendall A.F., Blockley J.G. The iron formation of the Precambrian Hamersley Group, Western Australia with special reference to the associated crocidolite // Western Australia Geol. Surv. Bull. 1970.

Грановская Наталья Васильевна,  
кандидат геолого-минералогических наук  
grannv@sfedu.ru

Попов Юрий Витальевич,  
кандидат геолого-минералогических наук  
popov@sfedu.ru

## RARE METAL MINERALIZATION IN AEGIRINE METASOMATITES, MIKHAILOVSKOE Fe DEPOSIT, KURSK MAGNETIC ANOMALY

N.V.Granovskaya,  
Yu.V.Popov

*Nd-La-Ce monazite in association with aegirine, magnetite, hematite, Mg-Fe carbonates, quartz, celadonite, and barite was found to occur in alkali metasomatites in Mikhailovskoe Fe deposit. The development of aegirine after ferruginous quartzite is controlled by major faults marked by linear oxidized and silicified rock bodies. Aegirine metasomatites of the Kursk Magnetic Anomaly could be prospective due to their possible relations to the rare metal and radioactive mineralization by analogy with the Krivoy Rog Province.*

*Key words: REE minerals, aegirin, alkali metasomatite, ferruginous quartzite, Mikhailovskoe Fe deposit, Kursk Magnetic Anomaly.*