

Продукты изменения оливина (симплектитовые срастания ортопироксена и амфиболов, серпентин, сапонит, сапонит и гетит) отражают параметры процессов минералообразования. Поэтому, зная степень изменения оливина и состав вторичных минералов, можно воссоздать постмагматические процессы преобразования горных пород.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гей, П. Некоторые наблюдения по иддингситу / П. Гей, Р.В. Ле Мэтр // Американский минералог. — 1961. — № 46. — С. 92–111.
2. Ефимов, А.А. Магнетит-ортопироксеновые симплектиты в уральских габбро: структурный след окисления оливина / А.А. Ефимов, К.Н. Малич // ЗРМО. — 2010. — № 5. — С. 18–28.
3. Осокин, А.С. Размещение и вещественный состав апатит-титаномагнетит-ильменитовых руд массива Гремяха-Вырмес / А.С. Осокин. — Апатиты: Изд. Кольского филиала АН СССР, 1987. — 90 с.
4. Патнис, А. Основные черты поведения минералов: Пер. с англ. / А. Патнис. — М.: Мир, 1983. — 304 с.
5. Полканов, А.А. Массив Гремяха-Вырмес на Кольском полуострове / А.А. Полканов. — М.: Наука, 1967. — 236 с.
6. Хитаров, Н.И. Процесс серпентинизации и связанные с ним вопросы / Н.И. Хитаров, В.Я. Леонидов, В.А. Пугин // Проблемы кристаллохимии минералов и эндогенного минералообразования. — Л.: Наука, 1967. — С. 194–210.
7. Эдвардс, Эндрю. Формирование Иддингсайта. О минерале / Эндрю Эдвардс // Американский минералог. — 1938. — С. 277–281.
8. Япаскурт, В.О. Структурогенез статического метаморфизма: Учеб. пособие / В.О. Япаскурт. — М.: Изд-во МГУ, 2004. — 152 с.
9. Brown, G. A structural study of iddingsite from New South Wales, Australia / G. Brown, I. Stephen // Amer. Mineral. — 1959. — № 44. — P. 251–259.
10. Champness, P.E. Nucleation and growth of iron oxides in olivines, (Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. / P.E. Champness // Mineral Mag. — 1970. — № 37. — P. 790–800.
11. Deer, W.A. Rockforming Minerals / W.A. Deer, R.A. Howie, J. Zussman, 1962. — Vol. 1. — 333 pp.
12. Delvigne, J. Olivines, their pseudomorphs and secondary products / J. Delvigne, E.V.A. Bisdom, J. Sleeman, G. Stoops // Pedologie. — 1979. — № 29. — P. 247–309.
13. Eggleton, R.A. (1984) Formation of iddingsite rims on olivine: A transmission electron microscope study / R.A. Eggleton // Clays & Clay Minerals. — 1984. — № 32. — P. 1–11.
14. Kitamura, M. Fine textures of laihunite, a nonstoichiometric distorted olivine-type mineral / M. Kitamura, B. Shen, S. Banno, N. Morimoto // Am Mineral. — 1984. — № 69. — P. 154–160.
15. Kohlstedt, D.L. An electron microscopy study of naturally occurring oxidation produced precipitates in iron-bearing olivines / D.L. Kohlstedt, J.B. Vander Sande // Contrib Mineral Petrol. — 1975. — № 53. — P. 1354.
16. Putnis, A. Electron petrography of high-temperature oxidation in olivine from Rhum layered intrusion / A. Putnis — Mineral Mag. — 1979. — № 43. — P. 293–296.
17. The alteration of olivine in basaltic and associated lavas Part 1: High temperature alteration / S.E. Haggerty, I. Baker // Contrib Mineral and Petrol. — 1967. — 16. — P. 233–257.
18. Weathering of basalt: formation of iddingsite / K.L. Smith, A.R. Milnes, R.A. Eggleton // Clays and Clay Minerals. — 1987. — Vol. 35. — No. 6. — P. 418–428.
19. Wilshire, H.G. (1958) Alteration of olivine and orthopyroxene in basic lavas and shallow intrusions / H.G. Wilshire // Amer. Mineral. — 1958. — № 43. — P. 120–147.
20. Wolfgang, Bach. Unraveling the sequence of serpentinization reactions: petrography, mineral chemistry, and petrophysics of serpentinites from MAR 15N (ODP Leg 209, Site 1274) / Wolfgang Bach, Holger Paulick, Carlos J. Garrido, Benoit Ildefonse, William P. Meurer, Susan E. Humphris // Geophysical research letters. — 2006. — Vol. 33. — P. 13306.

© Горбатова Е.А., Пирогов Б.И., 2021

Елена Александровна Горбатова // lena\_gorbatova@mail.ru  
Борис Иванович Пирогов // pirogov\_bi@inbox.ru

Лихникевич Е.Г., Ожогина Е.Г., Пермякова Н.А.  
(ФГБУ «ВИМС»)

#### МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ РУД

*На основании детальных минералогических исследований для редкометалльных руд Томторского и Чуктуконского месторождений установлены прогнозные критерии, определяющие выбор технологий их переработки: 1 — сложный морфоструктурный состав (переменный гранулярный состав, значительное количество тонкодисперсных и метаколлоидных образований, сформированных минеральными индивидами и агрегатами микро- и нанометрового размера), фазовая гетерогенность минеральных зерен, обусловленная различными причинами; 2 — переменный химический состав рудообразующих минералов, вызванный изоморфными замещениями атомов химических элементов в их кристаллической структуре; 3 — полиминеральный состав, связанный с одновременным присутствием минералов разных парагенетических ассоциаций. Установленные прогнозные минералогические критерии выбора технологий переработки редкометалльных руд позволяют обосновать оптимальные пути извлечения полезного компонента и обеспечивать комплексную переработку руд. **Ключевые слова:** редкометалльные руды, гранулярный состав, пирохлор, монацит, минералы группы крадаллита, гидроталлургические технологии.*

Likhnikovich E.G., Ozhogina E.G., Permyakova N.A. (VIMS)

#### MINERALOGICAL FORECAST OF CHOICE TECHNOLOGIES FOR PROCESSING RARE METAL ORES

*On the basis of detailed mineralogical studies for rare-metal ores of the Tomtor and Chuktukon deposits, forecast criteria are established that determine the choice of technologies for their processing: 1 — complex morphostructural composition (variable granular composition, significant number of fine-disperse and metacolloid formations formed by mineral individuals and micro- and nanometer-sized aggregate), phase heterogeneity of mineral grains caused by various reasons; 2 — variable chemical composition of ore-forming minerals caused by isomorphic substitutions of the atoms of chemical elements in their crystal structure; 3 — polymineral composition associated with the simultaneous presence of minerals of different paragenetic associations. The established predictive mineralogical criteria for the selection of technologies for processing rare metal ores allow us to justify optimal ways to extract a useful component and ensure the complex processing of ores. **Keywords:** rare metal ores, granular composition, pyrochlore, monazite, crandallite group minerals, hydrometallurgical technologies.*

Использование редких металлов в современных наукоемких отраслях и технологиях определяет динамичное расширение их потребления в экономически

развитых странах. Россия, занимая по разведанным запасам ведущее место в мире, существенно отстает в промышленном и инновационном отношении от этих стран. В соответствии со стратегией развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 г. ключевыми целями развития промышленности редких и редкоземельных металлов являются полное обеспечение потребностей предприятий оборонно-промышленного комплекса отечественными редкими и редкоземельными металлами, обеспечение внутреннего потребления редких и редкоземельных металлов при его дальнейшем росте и снижении доли импорта до минимального уровня (импортозамещение), а также выход на мировой рынок и повышение экспортного потенциала [7].

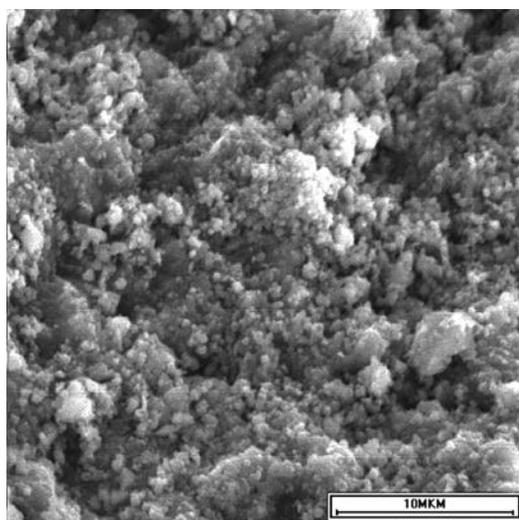
Отечественная минерально-сырьевая база редких металлов представлена преимущественно низкокачественными рудами, имеющими полиминеральный состав и сложные текстурно-структурные характеристики. Это сырье обладает непостоянным химическим и минеральным составами, обусловленными присутствием нескольких рудных фаз, отличающихся переменным составом с широким диапазоном изоморфизма; варьирующим гранулярным составом рудных минералов и их сложными морфометрическими характеристиками. Поэтому без глубокого минералогического изучения руд невозможно оценить их качество, обеспечить комплексную переработку, обосновать пути извлечения полезного компонента, оптимизировать технологический процесс путем направленного изменения свойств руды или минералов. Особенно актуальными становятся минералого-технологические исследования руд редкометалльных месторождений, промышленное освоение которых в ближайшие годы способно полностью удовлетворить потребность отечественной промышленности в редких металлах. Это, в первую очередь, касается месторождений, сосредоточенных в Сибири и Арктическом регионе: Чуктуконское (Красноярский край) и Томторское (северо-западная часть Якутии), являющихся крупнейшими кладовыми редких металлов, которые могут стать главными объектами модернизации редкометалльной промышленности России.

Гранулярный состав полезных минералов и их морфометрические характеристики обуславливают тип срастания минералов, являющийся главным фактором, определяющим их раскрываемость в руде и в продуктах ее обогащения.

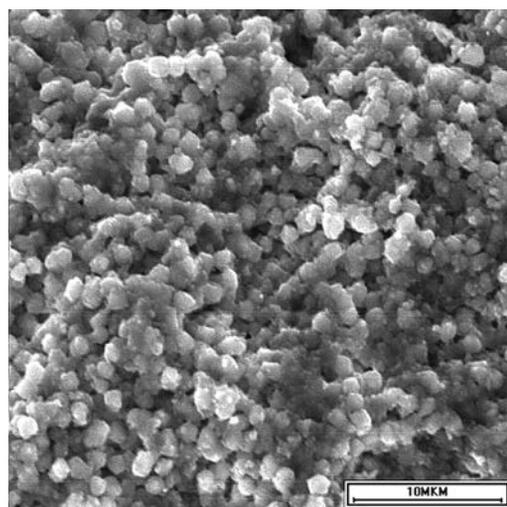
В пироклор-монацит-крандаллитовых рудах Томторского месторождения, сформированных несколькими полезными минералами (пироклором, монацитом, ксенотимом и минералами группы крандаллита) отмечается переменный гранулярный состав. Пироклор — главный минерал ниобия, представлен индивидуализированными кристаллами, обломками размером 0,001–0,5 мм и агрегатами, сформированными зернами размером первые микрометры. Иногда присутствуют зерна размером до 1,5 мм.

Еще больше варьирует размер зерен монацита. Наиболее ранний монацит встречается в виде мельчайших включений размером 10–15 мкм в кристаллах пироклора. Реликтовый монацит, унаследованный от латеритных охр, присутствует в виде зерен неправильной формы и агрегатов размером от первых микрометров до 3 мм, нередко корродирован минералами группы крандаллита.

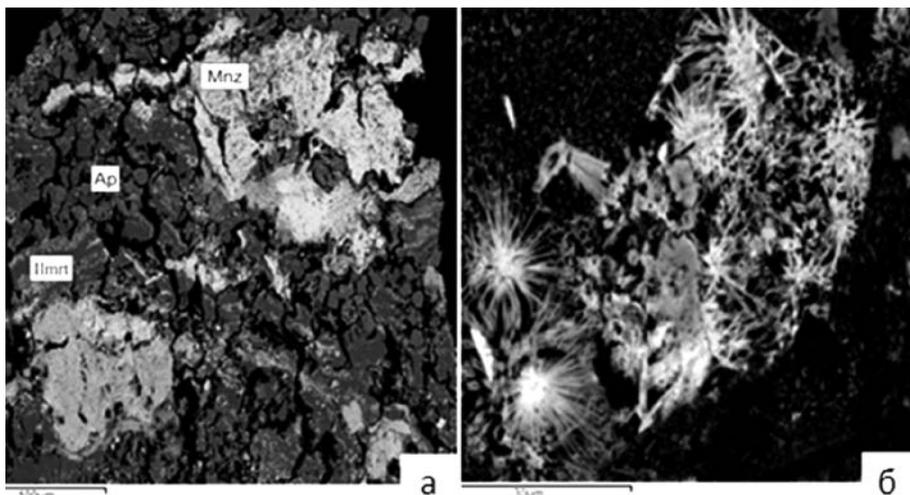
Минералы группы крандаллита, преобладающие в этих рудах, представлены тонкодисперсными метаколлоидными выделениями, в которых величина минеральных индивидов, по данным электронной микроскопии, обычно не превышает 1 мкм. В отдельных случаях прослеживается перекристаллизация с образованием зерен псевдокубической и таблитчатой форм, размером также менее 1 мкм. Очень редко отмечаются зерна размером около 5 мкм (рис. 1).



**Рис. 1.** Тонкодисперсный агрегат Sr-REE-содержащих алюмофосфатов, дисперсных оксидов Fe, Ti и, возможно, высокодисперсных монацита и пироклора, РЭМ



**Рис. 2.** Псевдокубические и таблитчатые выделения Sr-Ba-REE-содержащих алюмофосфатов из коллоидных многокомпонентных образований, РЭМ



**Рис. 3. Формы выделения монацита в руде:** а) обломки округлой, удлиненно-призматической, реже клиновидной формы; б) спутано-волоконистый, скелетный облик зерен; а, б — изображения в обратно рассеянных электронах

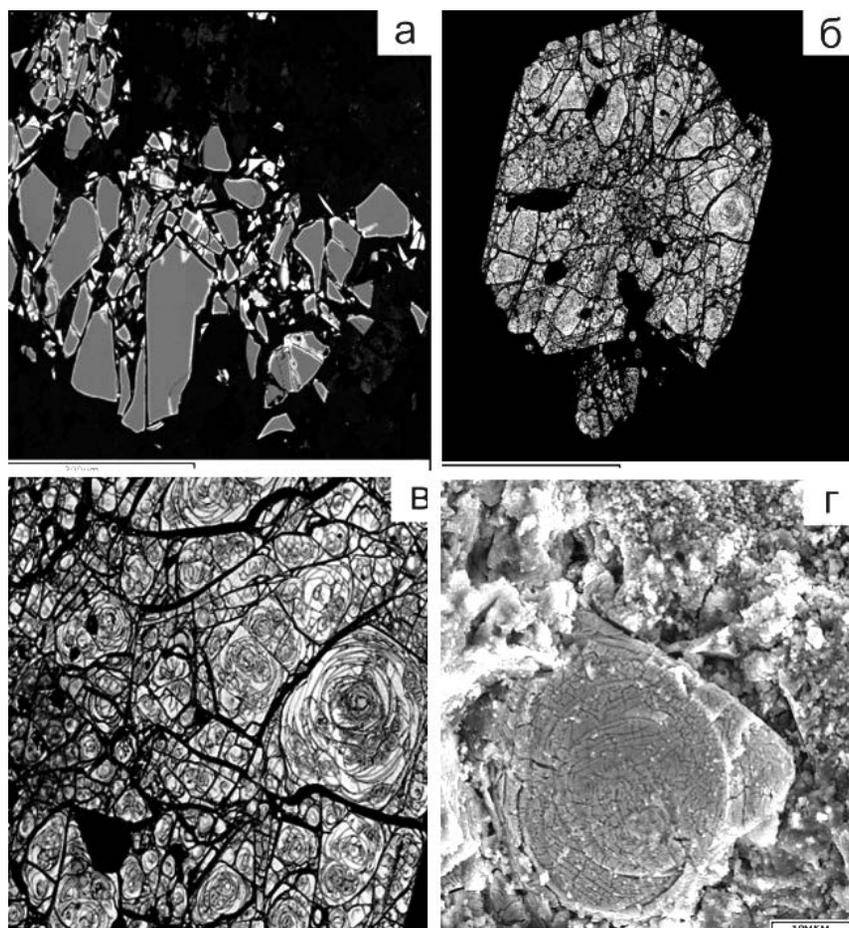
Пирохлор-монацит-гетитовые руды Чуктуконского месторождения также характеризуются переменным гранулярным составом с высокой долей тонкодисперсного материала размером менее 0,044 мм, на долю которого приходится более 50 %. Помимо варьирующего гранулярного состава для редкометалльных руд характерно сложное внутреннее строение зерен и минеральных агрегатов. Нередко сплошные агрегаты монацита (рис. 3а) сформированы длиннопризматическими кристаллами (размер подлинной оси 10–20 мкм, ширина — десятые доли микрометра), беспорядочно ориентированными в пространстве, иногда приобретающими субпараллельную ориентировку или образующие сферолитовые агрегаты. Такие кристаллы монацита представляют собой полые трубки, поверхность которых осложнена более мелкими разноориентированными трубками или шиповидными наростами. Также монацитовый агрегат может представлять собой решетчатое, спутанно-волоконистое, сетчатое или ажурное образование (рис. 3 б) [2, 3].

Характерна фазовая неоднородность минералов (распад твердых растворов, сингенетичные включения, зональный рост, многократные акты генерации, частичная перекристаллизация, твердофазовые вторичные преобразования и т.д.), а также дефектность зерен и агрегатов (трещиноватость, блочность, отдельность, пористость и пр.). Например, для пирохлора Томторского месторождения

типично и зональное строение, и дефектность минеральных зерен (рис. 4).

Типичной особенностью минералов редкометалльных руд является их переменный химический состав, обусловленный, в первую очередь, изоморфными замещениями атомов химических элементов в кристаллической решетке рудных и породообразующих минералов. Стадийность рудообразования приводит к образованию нескольких генераций или разновидностей одних и тех же минералов, отличающихся морфологией выделения, составом, строением и физическими свойствами.

Ярким примером изоморфизма в минералах являются минералы руд Томторского месторождения. Замещение катионов кальция и натрия на стронций, барий и свинец определяют четыре



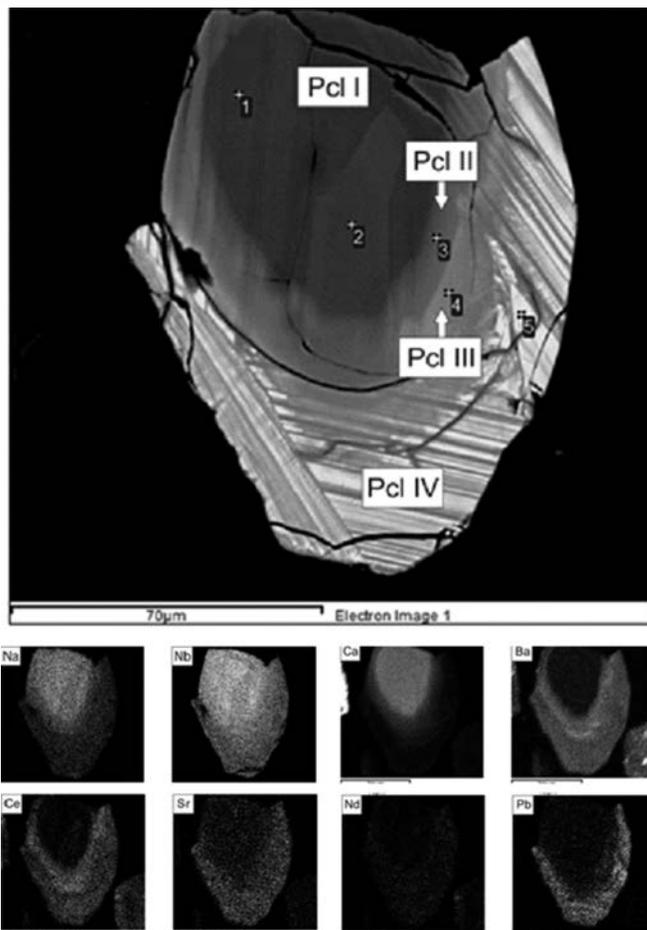
**Рис. 4. Внутреннее строение пирохлора:** а, б — дезинтеграция крупных кристаллов на мелкие блоки; а — начальная стадия преобразования пирохлора I, выражающаяся в появлении тонкой оторочки пирохлора II; в, г — скорлуповато-концентрическая отдельность; а-в — изображения в обратно рассеянных электронах, г — РЭМ

разновидности пирохлора — от первичного неизмененного Ca-Na- пирохлора, гипергенно измененного Sr-Ba, интенсивно измененного Pb-пирохлора (рис. 5).

В главных редкоземельных минералах — минералах группы крандаллита, характеризующихся общей формулой  $AV_3(XO_4)_2(OH)_6$ , где А — это крупный катион ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ag^+$ ,  $NH_4$ ,  $H_3O^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$ ,  $Sr^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Ce^{3+}$  и другие редкоземельные элементы (REE)), В —  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$  или  $Zn^{2+}$ ,  $XO_4-PO_4^{3-}$ ,  $SO_4^{3-}$ ,  $AsO_4^{3-}$ , прослеживаются изоморфные замещения во всех группах катионов (структурных позициях) [8]. Катионы А группы крандаллита определяют минеральные виды, являющиеся крайними членами ряда: собственно крандаллит ( $CaAl_3(PO_4)_2(OH)_6$ ), гоацит ( $SrAl_3(PO_4)_2(OH)_6$ ), горсейксит ( $BaAl_3(PO_4)_2(OH)_6$ ) и флоренсит ( $(REE)Al_3(PO_4)_2(OH)_6$ )-(Ce), -(La), -(Sm), -(Nd) [5]. В действительности минералы группы крандаллита имеют смешанные составы, доминируют при этом минеральные фазы промежуточного состава между флоренситом и гоацитом.

Интересной особенностью томторских руд является присутствие в них циркониевого ксенотима [1], в составе РЗЭ которого преобладают средние и тяжелые лантаноиды. Образование циркониевой разновидности ксенотима связано с изоструктурностью ксенотима и циркона, обусловленной входением циркония в кристаллическую структуру ксенотима. Это подтверждается прямой корреляцией между содержаниями  $ZrO_2$  и  $SiO_2$  в ксенотиме и обратной корреляцией  $Zr+Si$  и  $Y+P$ .

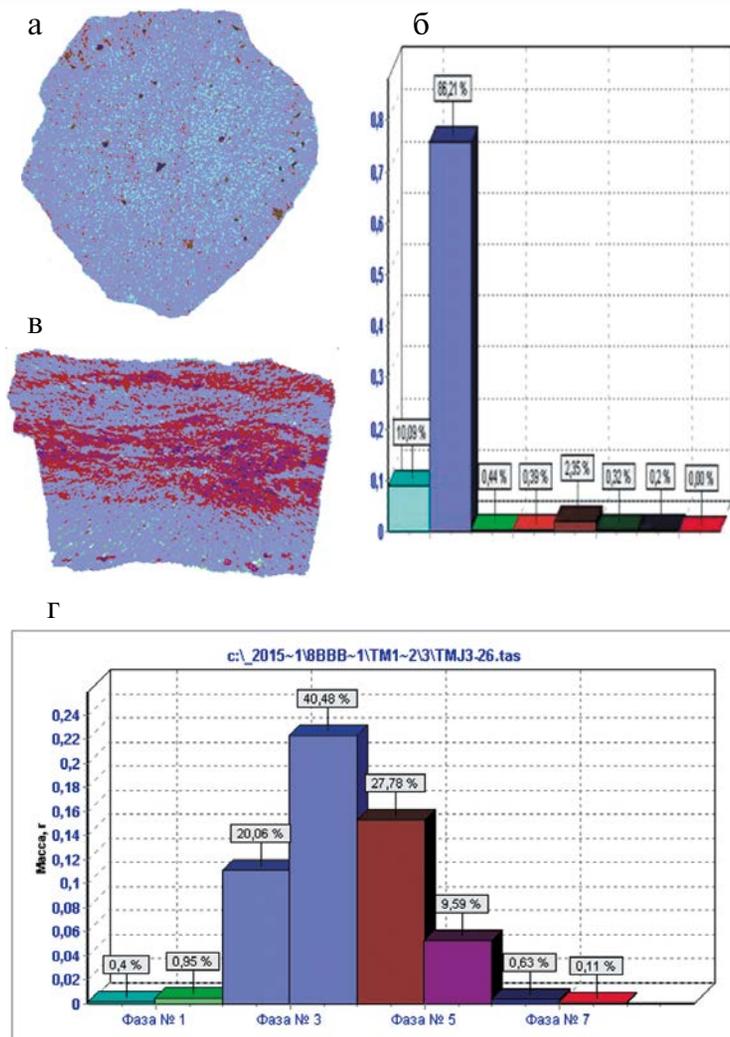
Редкометалльные руды являются комплексными полиминеральными образованиями, в которых полезные минералы могут быть представлены несколькими минеральными видами, тесно ассоциирующими между собой и встречающимися в переменном количестве. Так, полиминеральные руды латеритной коры выветривания Чуктуконского месторождения имеют существенно гетитовый состав [6]. Содержание гетита варьирует в значительных пределах и иногда достигает 70 %. В формировании руд принимают участие более 20 минералов. Редкоземельные минералы представлены Се- и La- монацитом, ксенотимом, церианитом и минералами группы крандаллита. За редкометалльную специализацию руд отвечает вторичный пирохлор, представленный несколькими разновидностями (стронциево-цериевой, стронциево-бариевой, стронциевой и смешанной барий-церий-стронциевой). В руде в переменном количестве отмечаются оксиды и гидроксиды марганца и каолинит. Специфической особенностью руд является практически постоянное присутствие пленок гетита на зернах монацита, которые «затушевывают» технологические свойства непосредственно этого минерала. Следует отметить, что рудные минералы тесно ассоциируют друг с другом и породообразующими фазами, образуют сложные по составу полиминеральные агрегаты, нередко отличающиеся высокой дисперсностью.



**Рис. 5. Гипергенно преобразованный пирохлор, изображения в рентгеновском характеристическом излучении по результатам рентгеноспектрального микроанализа**

Более сложным составом отличаются руды Томторского месторождения, в формировании которых принимают участие более 80 минералов [4], главными и второстепенными среди которых, являются: оксиды (пирохлор, ильменорутит, рутил, гетит, гематит), фосфаты (монацит, минералы группы крандаллита, апатит, ксенотим), карбонаты (сидерит), слоистые алюмосиликаты (каолинит, иллит), сульфиды (пирит, марказит, халькопирит, сфалерит, галенит). Несмотря на то, что отдельные минералы, например, пирохлор, образуют индивидуализированные зерна, большая часть руд представлена тонкодисперсными агрегатами сложного минерального состава (рис. 6).

Таким образом, редкометалльные руды Томторского и Чуктуконского месторождений отличаются переменным, в целом весьма тонким гранулярным составом со значительной долей дисперсного материала микро-нанометрического размера. Для них типичен полиминеральный состав, обусловленный одновременным присутствием нескольких полезных минералов, ассоциирующих друг с другом и породообразующими фазами в различных сочетаниях и количественных соотношениях. Специфической особенностью руд являются широко развитые в рудообразующих минералах изоморфные замещения, отмечается



**Рис. 6.** Тонкодисперсная руда полиминерального состава. **Томторское месторождение:** а, в — обработка томограмм по системе «TomAnalysis», б, г — гистограммы соотношения фаз, %; голубое — минералы группы крандаллита, светло-зеленое — апатит, лососевое — карбонаты (сидерит), коричневое — монацит, темно-зеленое — пиррохлор измененный, темно-синее — пиррохлор первичный, малиновое — галенит

широкий диапазон изоморфизма как в катионной, так и в анионной частях. Все это в совокупности негативно влияет на обогащение руд механическими методами, делая их практически необогатимыми. В то же время именно эти минералогические особенности руд определяют возможность применения при их переработке методов пиро-гидрометаллургического передела, позволяющих получить продукцию широкого ассортимента и требуемого промышленностью качества. На основании детальных минералогических исследований для редкометалльных руд Томторского и Чукотского месторождений установлены прогнозные критерии, определяющие выбор технологий их переработки:

— сложный морфоструктурный состав (переменный гранулярный состав, значительное количество тонкодисперсных, метаколлоидных образований, сформированных минеральными индивидами и агре-

гатами микро- и нанометрового размера); фазовая гетерогенность минеральных зерен, обусловленная различными причинами;

— переменный химический состав рудообразующих минералов, вызванный изоморфными замещениями атомов химических элементов в их кристаллической структуре;

— полиминеральный состав, связанный с одновременным присутствием минералов разных парагенетических ассоциаций.

Установленные прогнозные минералогические критерии выбора технологий переработки редкометалльных руд позволяют обосновать оптимальные пути извлечения полезного компонента и обеспечивать комплексную переработку руд.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмин, В.И. К минералогии уникального редкометалльного месторождения карбонатитового массива Томтор / В.И. Кузьмин // Минералогия во всем пространстве сего слова: проблемы укрепления минерально-сырьевой базы и рационального использования минерального сырья: сб. матер. годичного собрания РМО. — Санкт-Петербург, 9–11 октября 2012 г. — СПб: Горный ун-т, 2012 г. — С. 30–32.
2. Кузьмин, В.И. Рудные минералы месторождения Томтор и их поведение в технологических процессах / В.И. Кузьмин, Е.Г. Лихникевич, Е.Г. Ожогина // Повышение инвестиционной привлекательности комплексных редкометалльных месторождений с целью подготовки их к лицензированию и освоению: матер. всероссийской науч.-практ. конф. / Под ред. А.А. Кременецкого. — Москва, 24–25 апреля 2014 г. — М.: ИМГРЭ, 2014. — С. 117–118.
3. Лазарева, Е.В. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) / Е.В. Лазарева, С.М. Жмодик, Н.Л. Добрецов и др. // Геология и геофизика. — 2015. — Т. 56. — № 6. — С. 1080–1115.
4. Лазарева, Е.В. Новое в минералогии богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) / Е.В. Лазарева [и др.] // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северовостока России: матер. всерос. науч.-практ. конф. — Якутск, 31 марта – 2 апреля 2015 г. — Якутск: СВФУ, 2015. — С. 244–249.
5. Лапин, А.В. Некоторые особенности минерального состава, структуры и генезиса уникальных комплексных редкометалльных руд месторождения Томтор / А.В. Лапин, А.В. Толстов, И.М. Куликова // Новые данные по минералогии и геохимии редкометалльных месторождений.
6. Лихникевич, Е.Г. Технологическая оценка пиррохлор-монацит-гетитовых руд Чукотского рудного поля в рамках геолого-технологического картирования / Е.Г. Лихникевич [и др.] // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения — 2017): матер. междунар. науч. конф. / Под ред. В.А. Чантурия, А.П. Козлов, Т.В. Чекушина. — Красноярск, 12–15 сентября 2017 г. — Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. — С. 66.
7. Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года (Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 декабря 2018 года №2914-р).
8. Hogarth, D.D. Pyrochlore, apatite and amphibole: distinctive minerals in carbonatite / D.D. Hogarth // Carbonatites: genesis and evolution. — London: Unwin Hyman, 1989. — P. 105–148.

© Лихникевич Е.Г., Ожогина Е.Г., Пермякова Н.А., 2021

Лихникевич Елена Германовна // [likhnikееvich@mail.ru](mailto:likhnikееvich@mail.ru)

Ожогина Елена Германовна // [vims-ozhogina@mail.ru](mailto:vims-ozhogina@mail.ru)

Пермякова Наталья Анатольевна // [permykovana@mitht.ru](mailto:permykovana@mitht.ru)