

инструментом в горнодобывающей промышленности во многих странах (США, Китай, Канада, Германия и Австралия) в последние несколько лет. Месторождения руды Немур были обнаружены с использованием данных дистанционного зондирования, таких как данные Aster и изображение Landsat-8 (например, месторождение золота на холмах Красного моря в северо-восточном Судане, месторождение порфира в южной части медного пояса Кермана в Иране и обнаруженное месторождение хромита в Массив Логар в Афганистане [7, 8].

Таким образом, улучшение региональных методов картирования за счёт комбинирования существующих и дополнения новых методов, в частности связанных с интерпретацией космических снимков, будет эффективно для предварительного обнаружения большего количества минерализации в регионе, а геологические позволят определить структурные факторы, контролирующие минерализацию. Для разработки эффективных инструментов для обнаружения многочисленных скрытых рудных месторождений следует применять комбинацию различных методов и приемов разведки.

Литература

1. A. Kumah, "Sustainability and gold mining in the developing world," *J. Clean. Prod.*, vol. 14, no. 3–4, pp. 315–323, 2006, doi: 10.1016/j.jclepro.2004.08.007.
2. C. Rücker, T. Günther, and F. M. Wagner, "pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics," *Comput. Geosci.*, vol. 109, no. July, pp. 106–123, 2017, doi: 10.1016/j.cageo.2017.07.011.
3. W. Cumming, *Geophysics and resource conceptual models in geothermal exploration and development*. Elsevier Ltd, 2016.
4. H. Shirmard, E. Farahbakhsh, R. D. Müller, and R. Chandra, "A review of machine learning in processing remote sensing data for mineral exploration," *Remote Sens. Environ.*, vol. 268, no. February 2021, p. 112750, 2021, doi: 10.1016/j.rse.2021.112750.
5. G. S. Roonwal, *Remote sensing in mineral exploration*. 2018.
6. D. Reif, B. Grasemann, and R. H. Faber, "Quantitative structural analysis using remote sensing data: Kurdistan, northeast Iraq," *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, vol. 95, no. 6, pp. 941–956, 2011, doi: 10.1306/11151010112.
7. M. Ibrahim, A. Kotelnikov, P. Podolko, and E. Kotelnikova, "Remote sensing data for Geological mapping and gold prospecting of Inteat area, northern Sudan," *E3S Web Conf.*, vol. 258, p. 03009, May 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202125803009.
8. R. Manuel, M. da G. Brito, M. Chichorro, and C. Rosa, "Remote sensing for mineral exploration in central Portugal," *Minerals*, vol. 7, no. 10, pp. 1–30, 2017, doi: 10.3390/min7100184.

МИНЕРАЛЬНЫЕ ФОРМЫ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ В ЖЕЛЕЗНЯКАХ МОРСКОГО И КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ГЕНЕЗИСА НА ПРИМЕРЕ БАКЧАРСКОГО (РОССИЯ) И ЛИСАКОВСКОГО (КАЗАХСТАН) МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Калинина Н.А., Рудмин М.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Ооидовые железняки – это хемогенные осадочные горные породы с повышенной долей валового железа и состоящая из более чем 5 % железистых ооидов. Известно более 500 месторождений, обобщенных как фанерозойские ооидовые железняки [2]. Среди них выделяют два основных типа: морские и континентальные (аллювиальные и аллювиально-озерные).

Ооидовые железняки состоят из хемогенных форменных элементов (ооидов, пелоидов и пр.) и терригенных компонентов, сцементированных цементом или матриксов различного состава. Основные *in situ* минералы представлены оксидами (гетит), гидроксидами (лепидокрокит, гидрогетит), силикатами (шамозит, бертьерин, глауконит) и карбонатами (сидерит) железа. Помимо железа в ооидах отмечаются повышенные содержания Si, Al, Mg, P, K, Ti и V, а также редкоземельных элементов (РЗЭ) [3]. Целью данной работы является сравнительный анализ минеральных форм РЗЭ в ооидовых железняках различного генезиса для оценки их перспективности на получение редких металлов [1]. В качестве объектов рассмотрены месторождения ооидовых железняков, сформированные в континентальных (Лисаковское месторождение) и морских (Бакчарское месторождение) обстановках.

Лисаковское месторождение расположено в пределах Тургайской прогиба и приурочено к кутанбулакской свите среднего олигоцена [7], представленной аллювиальными, преимущественно песчаными отложениями с ооидами гидрогетита, выполняющими древние речные долины. Верхнемеловое-нижнепалеогеновое Бакчарское месторождение расположено в Западной Сибири, в пределах слабо проявленного тектонического поднятия [6]. Рудоносные пласты и линзы залегают среди трансгрессивных прибрежных мелководных морских отложений [4]. Для изучения минералов РЗЭ в ооидовых железняках использовались следующие аналитические методы: петрографический анализ, сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), и масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) и масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (ЛА-ИСП-МС).

В ооидовых железняках Лисаковского и Бакчарского месторождений отмечены повышенные содержания РЗЭ. При этом суммарное содержание РЗЭ в железняках Бакчарского месторождения варьирует на уровне 272,7...788,2 г/т, что в несколько раз выше, чем в лисаковских рудах (40,8...106,2 г/т). Для Бакчарского месторождения характерна слабая положительная корреляция между легкими и тяжелыми РЗЭ. Морские ооидовые железняки демонстрируют положительные Ce- и Eu-аномалии. В речных лисаковских рудах относительно морских бакчарских руд положительная Eu аномалия (Eu/Eu*) выше, а положительная Ce аномалия (Ce/Ce*) незначительно ниже [3]. При этом собственно в основных форменных элементах (ооидах) существенно возрастает доля РЗЭ по данным ЛА-ИСП-МС. Среднее содержание РЗЭ в кортексе железистых ооидов Бакчарского месторождения составляет 1583,6 г/т (максимальное 7779,3 г/т).

Среди ооидовых железняков Бакчарского и Лисаковского месторождений обнаружены как терригенные, так и аутигенные РЗЭ-содержащие минералы. Среди терригенных минералов РЗЭ преобладает монацит, вторичное значение имеет ксенотим. Аутигенные минералы представлены фосфатом легких РЗЭ (ЛРЗЭ; рис. 1, а-д) и оксидом Се (рис. 1, е). ЛРЗЭ-фосфаты характеризуются разнообразной формой и размерами зерен. Минералы входят в состав железистых сфероидов в виде включений и агрегатов, местами образуя отдельные concentрические зоны (рис. 1, а). Их отдельные кристаллы встречаются редко [3]. Фосфат встречается в основном в виде ксеноморфных частиц (рис. 1 в), реже образует призматические кристаллы (рис. 1, б, г). В рудах Бакчарского месторождения можно встретить микросферулы фосфата-ЛРЗЭ с concentрическим внутренним строением (рис. 1, д). Состав ЛРЗЭ-фосфата характеризуются выдержанным трендом $Se > La \geq Nd$. Руды Бкчарского месторождения отличаются наличием церита. Этот минерал указывает на окислительные условия. Можно предположить, что обогащение церием Бакчарских железняков является результатом более высокой степени зрелости (или более высокая диагенетической измененности) этого месторождения, развивавшегося при колебания окислительно-восстановительных условий, что привело к иммобилизации Се в виде твердой фазы с низкой растворимостью [3]. Порядковое повышение суммарной доли РЗЭ в кортексе ооидов морского происхождения указывает на тесную связь процессов образования форменных элементов и концентрирования редкоземельных металлов. Вероятно, это объясняется механизмом непрерывной абиогенной адсорбцией ферригидрита и других ионов на его поверхности, включая лантаноиды.

При сопоставлении железняков Лисаковского месторождения с морскими железняками Бакчарского месторождения (Западная Сибирь) отмечается ряд особенностей в распределении РЗЭ в валовом составе руд. Отличительной особенностью является истощение легкими РЗЭ при сохранении Се и Eu аномалий, отражающих комплексные источники этих металлов (рис. 2). Распределение РЗЭ в железняках Лисаковского месторождения согласуется с предложением о выветривании ранее сформированных морских железняков Западной Сибири типа Аятского, Синаро-Теченского или Бакчарского месторождений [5]. Растворение неустойчивых фаз морских железняков в аэробных условиях дельтово-руслового осадконакопление способствовало истощению РЗЭ, которые ранее концентрировались в сульфидно-сульфатной и карбонатной фазах, соответственно [5].

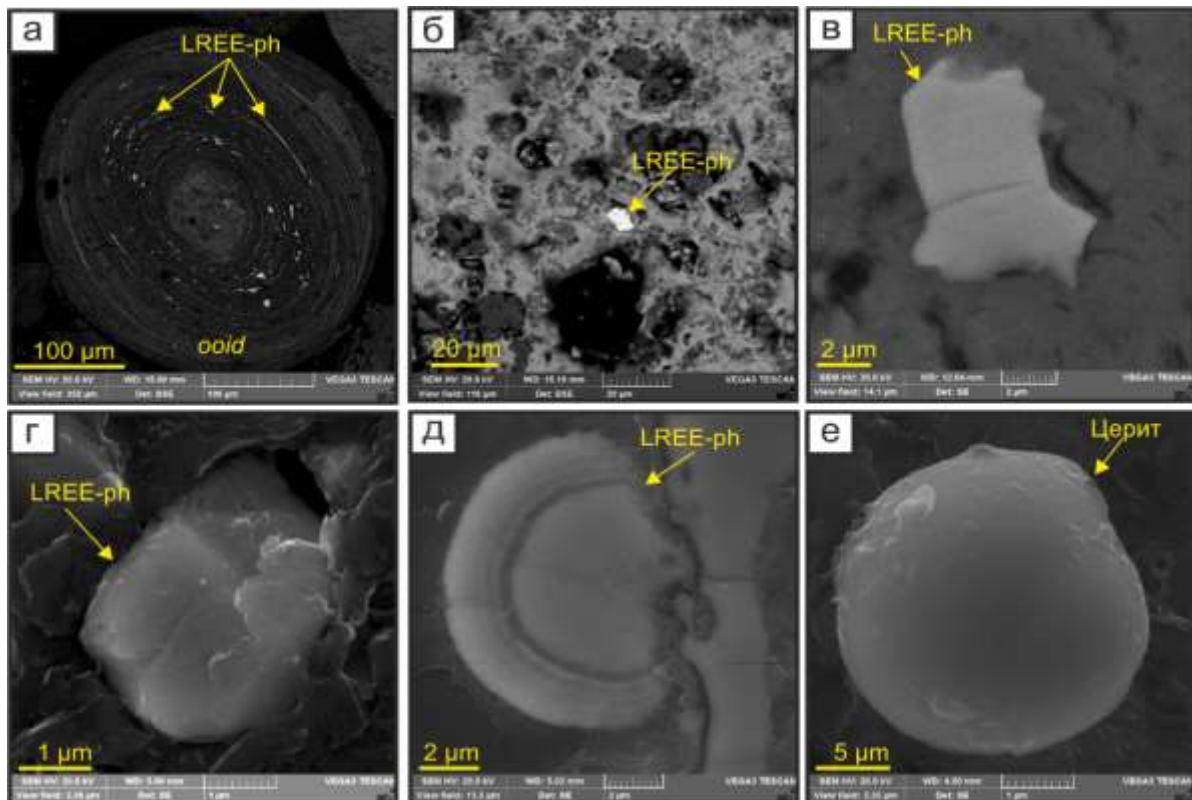


Рис. 1. СЭМ-снимки РЗЭ-фосфата (а-д) и церита (е) в ооидах и цементе железняков Лисаковского (б, в) и Бакчарского (а, г-е) месторождений. LREE-ph – фосфат лёгких редкоземельных элементов

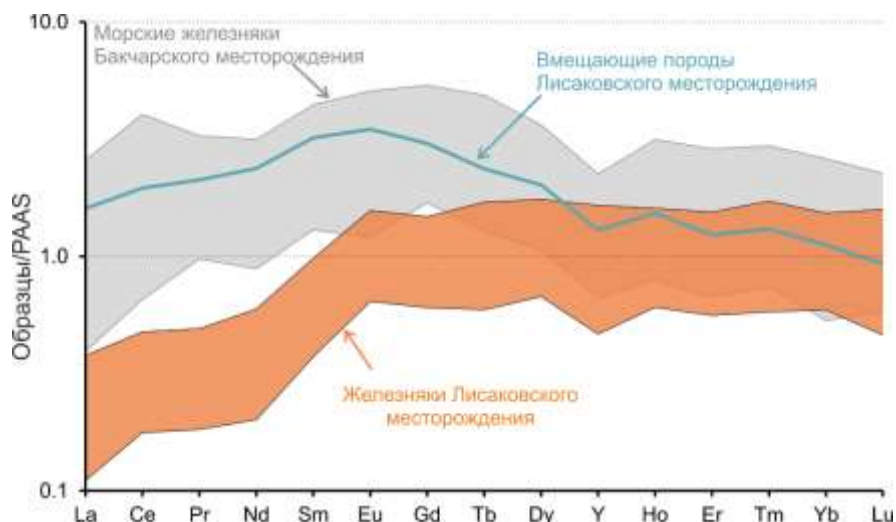


Рис. 2. Спектры распределения РЗЭ ооидовых железняков Лисаковского месторождения в сравнении с морскими железняками Бакчарского месторождения. Данные нормированы на средние содержание микроэлементов в постархейском австралийском сланце (РААС) [5]

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 20-77-00007).

Литература

1. Dutrizac J.E., Soriano C., Behaviour of the rare earths during goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) precipitation from sulphate-based solutions. *Hydrometallurgy*, 2018. – V. 176. – P. 87–96.
2. Petranek J., Van Houten F.B. Phanerozoic ooidal ironstones // *Czech Geological Survey Special Papers*. – 1997. – V. 7. – P. 71.
3. Rudmin M. et al. Minerals of Rare Earth Elements in High-Phosphorus Ooidal Ironstones of the Western Siberia and Turgai Depression // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10. – № 11. – P. 1 – 16.
4. Rudmin M. et al. Ooidal ironstones in the Meso-Cenozoic sequences in western Siberia: assessment of formation processes and relationship with regional and global earth processes // *Journal of Palaeogeography*. *Journal of Palaeogeography*. – 2020. – Vol. 9. – № 1. – P. 1–21.
5. Rudmin M., Kalinina N., Banerjee S., Reva I., Kondrashova E., Kanaki A., Trubin Y., Baldermann A., Mazurov A., Origin of Oligocene channel ironstones of Lisakovsk deposit (Turgay depression, northern Kazakhstan). *Ore Geology Reviews*. – 2021. – 104391.
6. Белоус Н.Х. и др. Западно-Сибирский железорудный бассейн. – Новосибирск: СО РАН СССР, 1964. – 448 с.
7. Формозова Л.Н. Формационные типы железных руд докембрия и их эволюция // *Труды ГИН АН СССР. Геологическая серия*. – 1973. – Т. 250. – С. 172.

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАРАМУРУН

Кемельбаева И.С.

Научный руководитель профессор Арбузов С.И.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Месторождение Карамурун – пластово-инфильтрационное, связанное с региональными зонами пластового окисления.

Расположено в северо-восточном борту Сырдарьинской впадины вблизи Карамурунского выступа хребта Большой Каратау. Охватывает северную часть близмеридиональной Карамурунской зоны и разделяется на два объекта – Северный и Южный Карамурун, которые были обнаружены, изучены и разведаны как самостоятельные месторождения, но на самом деле являются частями единого целого. Северный Карамурун в свою очередь является селенурановым, а Южный Карамурун урановым месторождениями.

В соответствии с историей геологического развития региона геологические формации, слагающие разрез, образуют три структурных яруса – метаморфизованные и дислоцированные образования фундамента, платформенные мел-палеоген-миоценовые терригенные отложения и верхнеплиоцен-антропогенные накопления суборогенной стадии тектогенеза.[1].

Формации фундамента, вскрываемого в пределах месторождений на глубинах 1000 и более метров, представлены метаспелитиками, метаалевролитами, известняками и сланцами ордовика, девона, нижнего карбона, инъецированными интрузиями гранитоидов позднего палеозоя.

Рудовмещающей структурой для всего урановорудного района, является толща платформенных континентальных отложений аллювиального, аллювиально-пролювиального генезиса, датируемая как верхний мел. Общая мощность меловой толщи 270...300 метров. В разрезе толщи принято выделять отложения сеноманского,