

ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ,  
МЕТОДИКА ИХ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

УДК 553(510)

Б. С. ПАНОВ, В. И. АЛЕХИН

УНИКАЛЬНОЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ  
БАЙЮНЬ-ОБО

Охарактеризовано уникальное по запасам и качеству редкоземельных руд комплексное с ниобием и железом месторождение Байюнь-Обо, расположенное на севере КНР и приуроченное к новому Евразийскому минерагеническому поясу, контролируемому широтным линеamentом Карпинского, в месте его пересечения с меридиональным Тайханшаньским глубинным разломом.

Месторождение открыто в 1927 г. китайско-швейцарской геологической экспедицией как железорудное. Позже обнаружены бастнезит, монацит, эшинит и другие минералы, свидетельствующие о комплексном редкоземельно-ниобий-железорудном типе. В настоящее время из установленных в мире более 100 млн. т запасов редких земель на КНР приходится 43 млн. т, подавляющая часть которых сосредоточена в Байюнь-Обо. Это обеспечивает свыше 85% экспорта редкоземельной продукции мира [1, 5]. Помимо 40,1 млн. т оксидов редких земель при содержании 3–5,4% в рудах Байюнь-Обо установлены более 1 млн. т  $Nb_2O_5$  (0,1–0,14%), а также 470 млн. т железа [4], что выдвигает это месторождение в разряд уникальных.

Байюнь-Обо расположено в горном районе на севере КНР, во Внутренней Монголии, где доминируют абсолютные отметки 1400–1800 м. Месторождение приурочено к узлу пересечения глубинного Тайханшаньского субмеридионального разлома с рифтогенной зоной сочленения Северо-Китайской платформы и Монгольского геосинклинального складчатого пояса [3]. Эта зона — составная часть широтного Евразийского минерагенического планетарного пояса глубинного заложения (рис. 1), приуроченного к линеamentу Карпинского [2].

В южной части района месторождения обнаружены гнейсы, сланцы и железистые кварциты верхнего архея (3 млрд. лет). На них расположена толща осадочно-вулканогенных образований группы Байюнь-Обо позднепротерозойского (1,68–1,44 млрд. лет в соответствии с U-Pb, Th-Pb и Pb датировками) и раннепалеозойского возрастов общей мощностью более 10 км. Порода тол-

щи испытали интенсивный региональный, а также контактовый метаморфизм и метасоматоз, которые вызвали интрузии основных габброидов, щелочных пород и гранитоидов каледонского и варисского возрастов. На месторождении широко развиты карбонатиты в полосе длиной до 25 км и шириной до 1 км. Они встречаются преимущественно в виде даек во вмещающих породах. Установлены более 40 даек карбонатитов кальцит-доломитового состава мощностью от 1 до 17 м и протяженностью до 100 м. Простираение даек субмеридиональное, секущее региональные тектонические структуры широтного простирания. Изохронный возраст даек (Rb-Sr метод) 458–433 млн. лет [6]. Содержание редкоземельных элементов в

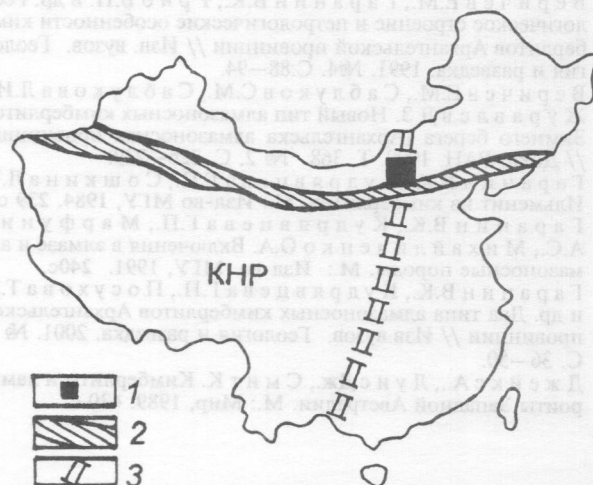


Рис. 1. Схема размещения месторождения Байюнь-Обо: 1 — месторождение Байюнь-Обо; 2 — линеament Карпинского; 3 — Тайханшаньский глубинный разлом

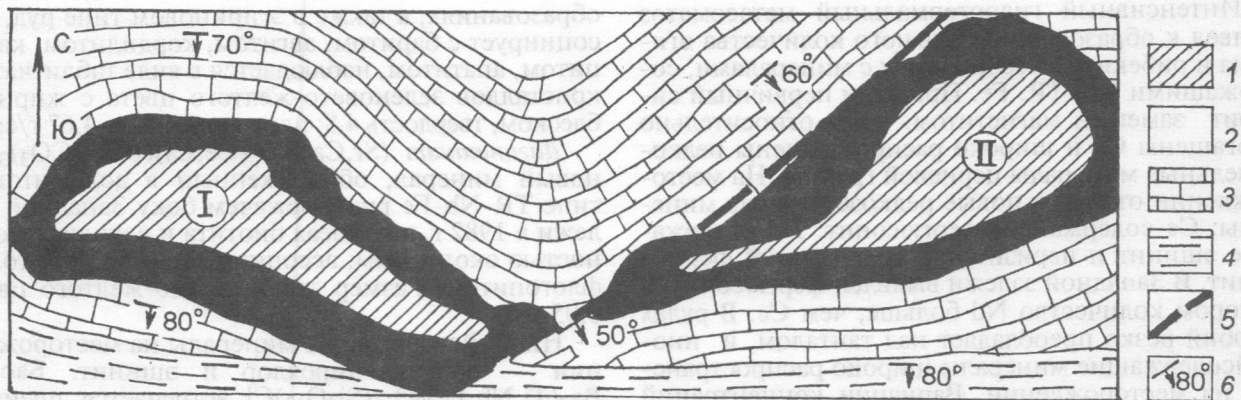


Рис. 2. Главная (I) и Восточная (II) рудные залежи [7]: 1 — редкоземельно-ниобий-железорудные тела; 2 — редкоземельно-ниобиевые руды; 3 — доломиты; 4 — сланцы слюдистые; 5 — разлом; 6 — элементы залегания

карбонатитовых дайках от 2 до 3,5%, вмещающие их породы интенсивно изменены и обогащены редкими землями.

Породы месторождения, представленные в основном песчано-глинистыми и карбонатными отложениями, интенсивно дислоцированы, собраны в складки и разбиты тектоническими нарушениями. Главные складчатые структуры — антиклиналь Куангоу и синклираль Байюнь, простирающиеся в широтном направлении на 15 км. Углы падения крыльев этих структур крутые — от 63° на севере до 73° на юге. Установлены широкие вариации пород по простирацию и на глубину: известняки северного крыла антиклинали Куангоу переходят в доломиты на южном крыле, которые к востоку сменяются по простирацию сланцами [7].

Разрывные нарушения представлены наибольшей в районе конседиментационной глубинной структурой Гаовой, прослеженной в широтном направлении между антиклиналью Куангоу и синклиралью Байюнь. Разлом Гаовой, падающий под углом 40° на юг, контролирует интенсивность деформаций в складчатых структурах района. Разлом Куангоу шириной от 10 до 300 м имеет также южное падение под углами 60–70°, по разлому южное крыло одноименной антиклинали надвинуто на северное. Помимо других нарушений широтного простираения отмечены северо-восточные и северо-западные надвиги.

Редкометалльно-ниобий-железорудная промышленная минерализация месторождения установлена в полосе широтного направления длиной 16 км и шириной 3 км. Минерализация приурочена к описанным складчатым структурам, осложненным тектоническими разломами. С востока на запад выделяются три основных рудных залежи: Восточная, Главная и Западная. Две первые приурочены к осевой части антиклинали Куангоу и протягиваются на 10 км при мощности до 200 м и более. Они разобщены протяженным северо-запад—юго-восточным разломом шириной до 150 м (рис. 2). Эти залежи — наиболее богатые, содержат в комплексных рудах не только до 45% и более железа, но и от 5,71 до 6,7% редких земель и от 0,126 до 0,14% ниобия. Руды здесь разрабатываются карьерным способом. Западная рудная залежь расположена в 3,5 км от Главной, прослежена на 10 км в широтном направлении при шири-

не 1 км и состоит из 11 основных и 102 второстепенных рудных пластово-линзовидных тел, приуроченных к складчатим доломитам и слюдистам. Наибольшее тело № 10 протяженностью 1850 м и мощностью более 100 м прослежено до глубины 800 м (рис. 3). Оруденение Западной залежи комплексное с промышленными содержаниями всех трех компонентов руд.

В целом на месторождении выделены девять типов руд, отличающихся вещественным составом и структурными особенностями [7]. Шесть из них характеризуют TR-Nb-Fe руды (от массивных до доломитовых и биотитовых) и три — TR-Nb руды (эгириновые, доломитовые и слюдисто-полевошпатовые). Массивные, обогащенные железом руды развиты в центральных частях залежей, остальные типы руд (эгириновые, флюоритовые, рибекитовые, доломитовые и биотитовые) — выше и ниже. Редкоземельно-ниобиевые руды в основном приурочены к периферическим частям Восточной и Главной залежей (рис. 2). В рудах выявлены 170 минеральных видов и разновидностей, сложенных 74 химическими элементами: Fe, Nb, TR, Sc, Th, Mn, Ti, Ba, Na, K, F, P, Ca, Mg, S и др. Руды имеют высокие отношения концентраций таких элементов и групп элементов, как Nb/Ta,  $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ , Th/U, Ba/Sr.

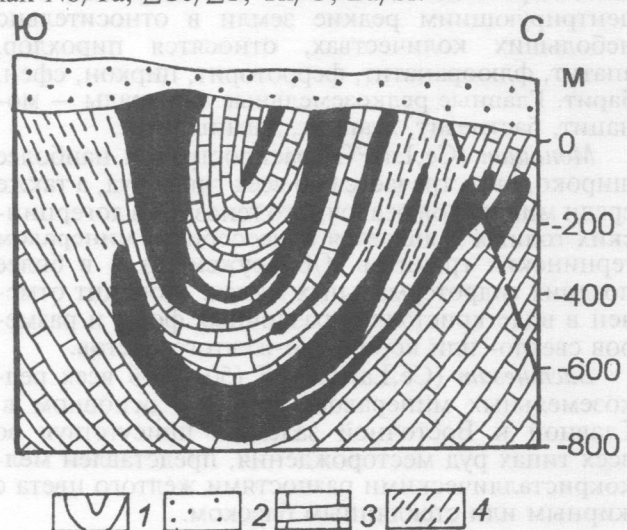


Рис. 3. Западная рудная залежь, разрез [7]: 1 — рудные тела; 2 — перекрывающие рыхлые отложения; 3 — доломиты; 4 — слюдисты

Интенсивный гидротермальный метасоматоз привел к образованию большого количества эгирин и рибекита в ассоциациях с минералами, содержащими Nb, TR, Fe. При этом первичный сидерит замещен магнетитом. Руды относительно обогащены Ce и широко распространены редкоземельные минералы цериевой группы. На месторождении открыты новые редкоземельные минералы: Ce-содержащий фергусонит, Nd-содержащие эшинит и паризит, Nd-содержащий фергусонит. В Западной залежи выявлен фергусонит, в котором количество Nd больше, чем Ce. В рудах ниобий резко преобладает над танталом, и ниобийсодержащие минералы широко распространены на месторождении. Вариации концентраций элементов и изменения физико-химических условий привели к формированию многочисленных минеральных видов ниобатов, титано-ниобатов и оксидов Fe, Mn, TR, Ca, Na.

Один из характерных элементов руд — барий, который представлен главным образом баритом. На месторождении открыты шесть новых разновидностей барийсодержащих минералов: церийсодержащие хуанхит, цебаит, цонгуацерит; дагиншанит, баотит и бафертисит. Некоторые новые минеральные виды относятся к уникальным, например, из барий-редкоземельной серии.

На месторождении известны более 20 видов железосодержащих минералов, среди которых главные — магнетит, гематит и мартит. Магнетит ассоциирует с рибекитом, сидеритом, флогопитом, апатитом, флюоритом. В зонах окисления магнетит переходит в мартит. Широко распространен гематит, он входит в состав всех типов TR-Nb-Fe руд. Мартит — главный минерал зон окисления железных руд и широко распространен на глубины 50—70 м, иногда до 100 м. Лимонит интенсивно развит в Главной и Восточной рудных залежах.

Из редкоземельных минералов выявлены 28 видов и разновидностей, причем 14 открыты впервые: барий-редкоземельные из флюорит-карбонатной группы, группы эшинита, иттрий- и церийсодержащие группы фергусонита, новые неодимсодержащие соединения. К минералам, концентрирующим редкие земли в относительно небольших количествах, относятся пирохлор, апатит, флюорапатит, ферротрит, циркон, сфен, барит. Главные редкоземельные минералы — монацит, бастнезит, хуанхит, дагиншанит.

*Монацит* (Ce,La)PO<sub>4</sub> распространен наиболее широко, он встречается во всех типах руд, а также среди минералов осадочного генезиса в догерцинских толщах и является акцессорным минералом герцинских гранитов. Обнаружен он и в более поздних гидротермальных жилах. Монацит отмечен в виде кристаллов различных форм и размеров светло- или коричнево-желтого цветов.

*Бастнезит* (Ce,La)(CO<sub>3</sub>)F (50—70% всех редкоземельных минералов) развит в основном в Главной и Восточной залежах, присутствуя во всех типах руд месторождения, представлен мелкокристаллическими разностями желтого цвета с жирным или стекляннным блеском.

*Хуанхит* (Ce,La)Ba(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>F — первый новый минерал, открытый на месторождении Байюнь-Обо в 1961 г., выявлен в поздних жильных

образованиях, а также в эгириновом типе руд, ассоциирует с баритом, авгитом, кордилитом, кальцитом, апатитом, наблюдается в виде таблитчатых кристаллов зеленовато-желтого цвета с жирным блеском, твердость 4,8; плотность 4,51—4,67 г/см<sup>3</sup>.

*Дагиншанит* (Sr,Ca,Ba)<sub>3</sub>(Ce,La)(PO<sub>4</sub>)(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> — новый минерал, обнаруженный в доломитовом типе TR-Nb-Fe руд в лежачем боку Западной залежи в 1982 г. в полосах биотита и в жилках мощностью около 3 мм, ассоциирующий с пиритом и флогопитом. Размер зерен светло-желтого цвета 0,05 мм.

Ниобийсодержащие минералы на месторождении — баотит, пирохлор и эшинит. Баотит Ba<sub>4</sub>(Ti,Nb,Fe)<sub>8</sub>O<sub>16</sub>(Si<sub>4</sub>O<sub>12</sub>)Cl встречается преимущественно в кварцевых жилах среди кварцитов южной части рудного района, а также в эгириновом и рибекитовом типах комплексных руд в ассоциации с альбитом, галенитом, пиритом и др. Во многих минералах, в том числе редкоземельных, ниобий находится в виде изоморфной примеси.

Изотопный состав серы в сульфатах и сульфидах руд варьирует от -2,7 до +4, что указывает на мантийный источник серы. Об этом же свидетельствуют изотопы стронция (<sup>87</sup>Si/<sup>86</sup>Si 0,7030—0,7056) в апатите. Значения δO<sup>18</sup> в доломитах протерозойской толщи составляют в среднем +14,7, а δC<sup>14</sup> -0,73, что подтверждает осадочное происхождение.

Датировки абсолютного возраста рудных минералов, полученные различными методами (Th-Pb, U-Pb, Sm-Nd, Ar<sup>40</sup>/Ar<sup>39</sup>), не совпадают. Например, Sm-Nd метод (1994 г.) для редкоземельных руд Главной и Восточной залежей показал возраст 1286±91 млн. лет, а для более поздних жильных минералов — 422±18 млн. лет. Таким образом, время образования комплексных редкоземельных руд — от позднего протерозоя до раннего палеозоя [7].

Относительно генезиса комплексных руд месторождения Байюнь-Обо существует несколько точек зрения. Наиболее обоснованы первично осадочное происхождение железных руд (железосодержащих карбонатов), их метаморфизм и образование окисных железных руд, на которые в процессе длительного гидротермального метасоматоза, связанного с более поздним карбонатитовым магматизмом, наложена ниобий-редкоземельная минерализация.

В заключение необходимо отметить, что геологические процессы на небольшой площади (около 30 км<sup>2</sup>) привели к формированию богатых комплексных руд различных формаций, особенно редкоземельных, развитию многочисленных видов и разновидностей минералов. Все это делает Байюнь-Обо уникальным во многих отношениях. В настоящее время и в перспективе оно — главный источник редких земель, добыча которых во всем мире выросла с 73,5 в 1997 г. до 85,0 тыс. т в 2000 г. Впечатляет рост их добычи в КНР за этот период — с 53,3 до 75,5 тыс. т [5]. Потребности мирового рынка в 2004 г. составят 100 тыс. т оксидов редких земель суммарной стоимостью около 1,2 млрд. дол. США, что обеспечит удовлетворение непрерывно растущего спроса на нужды про-

мышленности и новейших технологий. Особый интерес представляют уникальные магнитные и спектроскопические свойства оксидов редких земель, а также изготовленные на их основе катализаторы для нефтехимии и автомобильной промышленности, потребности специальной метал-

лургии, создание особых стекол и разработки стекловолоконной оптики, спецкерамики и др. Месторождение Байюнь-Обо имеет громадное значение для экономики всех развитых стран и позволяет КНР занимать лидирующие позиции в мире по экспорту оксидов редких земель и их солей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бойцов В.Е., Пилипенко Г.Н., Солодов Н.А. Месторождения благородных, радиоактивных и редких металлов. М.: НИИ-Природа, 1999.
2. Панов Б.С. Новый металлогенический и нефтегазоносный пояс Евразии // Геол.журнал (Киев) 1993. № 4.
3. Панов Б.С., Хуньцуйань Янь. О тектонике и минерагении северо-западной части КНР // Геотектоника. 1988. № 6.
4. Cheng Yunchuang et al. Mineral Resources of China. Publish House of Environmental Science. Beijing, 1996.
5. Dudley G. Rare earths. Mining Annual Review, 2001 // Mining Journal Ltd. London, 2001.
6. Li Shigin. A rediscussion on the origin of Bayan Obo rare metals bearing carbonatite et its niobium — rare earths — iron deposit, Nee Mongolia // Contr.Proj.Plate Tect, Northern China. 1983. № 1.
7. Tan Lin Zhang Xiaohong, Wu Zhanjiang, Wang Jinlong. Ore deposit, mineralogy and structural geology of Bayan Obo niobium-rare-earths-iron mine. Inner Mongolia autonomous region. Field trip guide of 30 th JGC. Beijing, 1996.

Донецкий национальный технический университет, Украина  
Рецензент — Н.Н. Трофимов

УДК 550.81:553/9

Т.О. БАБИНА

### АНАЛИЗ ОБЪЕКТИВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕДУРЫ КРИГИНГА

Рассмотрены вопросы влияния на результат кригинга наличия на месторождении регионального тренда и степени асимметричности распределения полезного компонента. Проанализировано воздействие на вариограмму элиминации тренда ортогональными полиномами разных порядков. На примере семи месторождений показана результативность применения симметризирующего преобразования в зависимости от количества исходных данных и степени асимметричности исходного распределения.

Кригинг сегодня — наиболее употребляемый в мировой практике способ подсчета запасов. Его относительная невостребованность в нашей стране объясняется как принципиальным отличием методики подсчета запасов от традиционной, так и наличием определенных факторов, требующих учета и непосредственно влияющих на эффективность. Условно такие факторы можно разбить на два типа: отражающие некоторые свойства объекта исследования (объективные); зависящие от параметров, принимаемых исследователем при выполнении процедуры кригинга (субъективные).

К первому типу относятся требования, предъявляемые процедурой кригинга к исходным данным. Линейный кригинг исходит из гипотезы, что результаты опробования — реализация многомерного случайного процесса со стационарным приращением и стационарным математическим ожиданием, при этом исходные данные должны быть распределены симметрично. Параметры кригинга, выбор которых целиком зависит от представлений геолога об изучаемом объекте, — это вид модельных функций для описания выборочной вариограммы и размер оптимального радиуса уче-

та проб при расчете значений коэффициентов кригинга.

Рассмотрим влияние, которое оказывают объективные факторы на процедуру кригинга. Для этого используем данные по опробованию ряда месторождений: золоторудных (Кочбулак, Школьное, Наталкинское, Аметистовое), молибденового (Первомайское, исходная сеть Первомайское 1 и один из вариантов разрежения исходной сети, использующийся в качестве самостоятельного объекта разведанного по редкой регулярной сети Первомайское 2) и редкометального (Томтор).

Для приведения данных разведки в соответствие с тем, что пробы — реализация многомерного случайного процесса со стационарным приращением и стационарным математическим ожиданием, требуется выделить региональный тренд (коррелированную составляющую закономерной изменчивости) и применять кригинг к остаточной составляющей. Просуммировав полученные при кригинге оценки значений остаточной составляющей с рассчитанными для тех же точек значениями закономерной составляющей, получим оценки значений признака.