

Перспективы промышленного освоения Карасугского карбонатитового редкоземельного месторождения (Республика Тыва, РФ)

Болонин А. В.

ЦНИГРИ, г. Москва, Россия

Аннотация. Карасугское карбонатитовое месторождение содержит крупные запасы комплексных железо-флюорит-барит-стронций-редкоземельных руд, сложных более чем на 80 % полезными минералами. Месторождение разведывалось в 1947–1954, 1979–1984 и 2004–2006 гг. Первичными рудами являются интрузивные сидеритовые карбонатиты, содержащие в среднем (мас. %): сидерит – 61; барит и баритоцелестин – 20; флюорит – 12; пирит – 3; бастнезит – 1–1,5; кварц – 1–2; апатит – 0,5; молибденит – 0,03; уранинит – 0,02. Карбонатиты на стадии аутометасоматоза местами были обогащены гематитом до 5–30 % и бастнезитом (второй генерации) до 1,5–2,5 %. На рудных залежах от дневной поверхности до глубины 100–300 м развита «железная шляпа», представленная окисленными комплексными рудами. Среди окисленных руд для первоочередного освоения оконтурен «богатый» блок с содержанием суммы редкоземельных оксидов от 1,5 до 3,1 %, в среднем 2,13 %. Разработана технологическая схема переработки первичной и окисленной руды с получением ассортимента продуктов: железного, баритового, флюоритового и бастнезитового концентратов, полирита, химических соединений бария, стронция, фтора, молибдена, урана. Месторождение находится в простых для открытой разработки горно-геологических условиях, связано шоссеиной дорогой и линией электропередач с городом Кызыл. Карасугское месторождение, в случае вовлечения его в эксплуатацию, будет иметь много конкурентных преимуществ перед другими редкоземельными объектами РФ.

Ключевые слова: Карасуг, редкие земли, бастнезит, разведка, запасы.

Для цитирования: Болонин А. В. Перспективы промышленного освоения Карасугского карбонатитового редкоземельного месторождения (Республика Тыва, РФ). Руды и металлы. 2026. № 1. С. 5–24. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10001.

Prospects for the industrial development of the Karasug carbonatite rare earth deposit (Republic of Tyva, Russian Federation)

Bolonin A. V.

Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals (FSBU TsNIGRI), Moscow, Russia

Annotation. The Karasug carbonatite deposit contains large reserves of complex iron-fluorite-baryte-strontium-rare earth ores composed of useful minerals for more than 80%. Geological exploration of the deposit was conducted in 1947–1954, 1979–1984, and 2004–2006. Primary ores of the deposit are represented by intrusive siderite carbonatites containing on average (wt.%): siderite – 61; baryte and barytocelestine – 20; fluorite – 12; pyrite – 3; bastnaesite (bastnäsite) – 1–1.5; quartz – 1–2; apatite – 0.5; molybdenite – 0.03; uraninite – 0.02. During the autometasomatism stage, the carbonatites were locally enriched in hematite (up to 5–30%) and bastnaesite (second generation) (up to 1.5–2.5%). The upper sections of the ore lodes, from the surface to a depth of 100–300 m, are represented by an "iron cap" composed of oxidized complex ores. Among the oxidized ores, a "rich" block with a total rare-earth oxide grade of 1.5 to 3.1%, averaging 2.13%, was outlined for the priority development. A technological process flow was developed for processing primary and oxidized ores to produce an assortment of products including the iron, baryte, fluorite, and bastnaesite concentrates; polyrite; and chemical compounds of barium, strontium, fluorine, molybdenum, and uranium. The mineral deposit is situated in favorable geological conditions for the open-pit mining and is connected to the city of Kyzyl by a highway and power line. If developed, the Karasug deposit will have many competitive advantages over other rare earth deposits in the Russian Federation.

Keywords: Karasug, rare earths, bastnaesite, exploration, mineral reserves.

For citation: Bolonin A. V. Prospects for the industrial development of the Karasug carbonatite rare earth deposit (Republic of Tyva, Russian Federation). Rudy i metally (Ores and metals). 2026. No. 1. pp. 5–24. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10001.



Введение

Карасугское месторождение, расположенное в Республике Тыва, включает в себе крупные запасы и прогнозные ресурсы комплексных железо-флюорит-барит-стронций-редкоземельных руд. В геологическом и минерогенетическом отношении оно охарактеризовано в многочисленных публикациях, включая диссертации А. С. Митропольского (1958, 1962), Д. О. Онтоева (1963, 1984), А. П. Хомякова (1964, 1971), А. В. Болонина (1984–2018), А. В. Никифорова (2004–2020), И. Р. Прокопьева (2014). В диссертациях последних трёх авторов обоснован первичный карбонатитовый магматический генезис месторождения.

В этой статье представляются данные, влияющие на оценку промышленной значимости месторождения. Постановка вопроса о возможности вовлечения Карасугского месторождения в разработку актуальна в свете активного обсуждения в последнее время в средствах массовой информации значения редкоземельных металлов в технологическом суверенитете РФ. В научной литературе последних лет в качестве будущего источника РЗМ* в стране на длительную историческую перспективу почти безальтернативно выбирается Томторское месторождение, расположенное на крайнем северо-западе Якутии [9]. Такой выбор представляется не столь безусловным в свете приводимых в настоящей статье данных. Карасугское месторождение вполне может стать альтернативным Томтору вариантом, особенно в случае прокладки в Туву запроектированной железной дороги.

История геологоразведочных работ

Карасугское месторождение имеет длительную историю геологического изучения.

* Используемые сокращения: РЗМ (или РЗЭ) – редкоземельные металлы (или элементы), включающие 14 химических элементов лантаноидного семейства (лантан, церий, празеодим, неодим, самарий, европий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций); сумма РЗМ (или TR) – сумма редкоземельных металлов; сумма РЗО (или TR₂O₃) – сумма редкоземельных оксидов.

Обнажения лимонитовых охр хорошо заметны на открытой холмистой местности и издавна были известны местному населению, употреблявшему эти минералы как краску. Впервые в литературе рудное проявление под названием Хожей упоминается в «Вестнике Общества сибирских инженеров» (1917 г.) в публикации посетившего проявление горного инженера Б. М. Порватова. После вступления в 1944 г. Тувы в состав СССР месторождение осенью 1946 г. осмотрели руководители Тувинской экспедиции ВСЕГЕИ Ю. А. Билибин и Д. В. Вознесенский, геологи Ф. А. Головачев и И. П. Резников. Были установлены комплексный состав (железо, флюорит, барит) и повышенная радиоактивность руд. Обширные размеры рудных выходов позволили принять решение о начале геологоразведочных работ. Месторождение именовали по названию близ протекающего ручья Кара-Суг.

Масштабные поисковые и разведочные работы на месторождении выполнялись трижды: в 1947–1954 гг. – Горной экспедицией [6], в 1979–1984 гг. – ПГО «Берёзовгеология», в 2004–2006 гг. – ОАО «Тувинская ГРЭ». Начиная с 1980 г., автору этой статьи удалось принять участие в работах Берёзовского ПГО [1], Тувинской ГРЭ, а также в научных исследованиях группы сотрудников ИГЕМ РАН [2, 7, 8].

В 1947–1954 гг. Карасугское месторождение разведывалось Горной экспедицией Первого Главного геологического управления (А. С. Митропольский, Н. С. Анастасиев, М. В. Любимов и др.). Был пройден большой объём горных выработок: 17 485 м³ канав, 5006 м³ шурфов, 1065 м шахт, 15 597 м штолен. Отобрано 23 455 м бороздовых проб, пробурено 41 153 м скважин колонкового бурения. Рудные залежи с поверхности разведаны канавами и шурфами по сети 10 × 25...20 × 50 м, крупные залежи на глубине 50–150 м вскрыты штольневые горизонты и до 300–550 м разбурены скважинами. В результате в рудном поле разведано восемь рудоносных карбонатитовых тел с крутопадающими залежами комплексных руд. Залежам в порядке обнаружения присвоены номера с 1 по 9 (залежи № 1 и 8 принадлежат

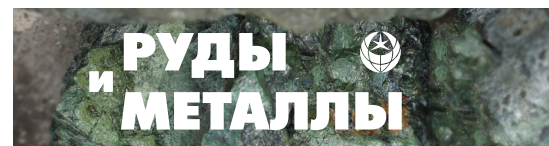


Табл. 1. Химический состав (мас. %) и запасы окисленных и первичных (неокисленных) руд Карасугского рудного поля (по данным Горной экспедиции, 1955 г. [6])

Table 1. Chemical composition (wt.%) and reserves of oxidized and primary (non-oxidized) ores of the Karasug ore field (according to data by the Gornaya Expedition, 1955 [6])

Тип руд Рудные залежи №	Окисленные									Первичные
	1	2	3	4	5	6	7	8	Всего 1–8	1 + 2 + 3 + 6
Запасы руды, млн т	25,18	31,88	12,6	10,2	1,68	39,18	2,19	4	127	148
Компоненты, мас. %:									среднее:	среднее:
Fe валовое	28,36	30,03	32,36	30,57	28,51	30,40	31,33	33,72	29,89 (1610)	27,98
FeO										23,52
BaSO ₄	12,31	17,66	20,70	23,27		22,90	23,35	14,05	19,48 (1210)	14,99
CaF ₂	6,62	11,39	11,50	13,69	9,33	13,96	15,51	11,08	11,71 (1332)	9,01
S валовая	3,24	2,73	3,10	3,46	3,61	3,87	3,85	2,91	3,46 (1442)	3,45
S сульфидная										1,48
P	0,151	0,112	0,100	0,070		0,050	0,030	0,050	0,090 (785)	0,09
MnO	0,295	0,675	0,255	0,56		0,66			0,45	
TiO ₂	0,18		0,195	0,39					0,26	
SiO ₂	15,44	11,82	8,44	9,04	12,52	9,63	8,65	9,94	11,28 (872)	9,89
Al ₂ O ₃	3,46	5,92	3,06			4,12			4,33 (192)	
Mo	0,045	0,025	0,020	0,025		0,020			0,030	
U									0,019	0,018
По данным М. В. Любимова, 1958 г.										
SrO	2,46 (20)	2,01 (10)	4,15			1,00 (8)			2,1 (39)	4,03 (36)
TR ₂ O ₃ (сумма PЗО)	1,15	1,19	1,32			0,69			1,07 (39)	1,15 (36)
Объёмный вес, т/м ³ :									2,70	3,44

Примечание. В скобках число анализов.

одному карбонатитовому телу). Крупные рудные залежи № 1, 2 и 6 по своим размерам допускают создание на их базе самостоятельных горнодобывающих предприятий (карьеров), что выводит их в ранг месторождений, а всю совокупность залежей – в ранг рудного поля.

В рудных залежах установлено распространение двух главных технологических типов руд: первичных (неокисленных) флюорит-барит-гематит-сидеритовых и окисленных флюорит-барит-гематит-железогидроксидных (названы по главным минералам в порядке увели-

чения количества). Раздельно для первичных и окисленных руд произведён подсчёт запасов железа, барита, флюорита и урана по состоянию на 1 января 1955 года. С запозданием были подсчитаны запасы редкоземельных металлов и стронция (М. В. Любимов, 1958), содержания которых в комплексных рудах были оценены по групповым пробам, составленным из дубликатов рядовых бороздовых и керновых проб. Химический состав и запасы руд сведены в таблице 1. Всего подсчитано 127 млн т окисленной руды по категориям А + В + С₁

и 148 млн т первичной руды по категориям $C_1 + C_2$. Оба подсчёта были утверждены ГКЗ СССР, но впоследствии запасы были списаны с баланса.

В период 1979–1983 гг. на Карасугском рудном поле геологоразведочные работы проводились партией № 819 ПГО «Берёзовгеология» (Г. М. Комарницкий, В. К. Максимов и др.). Была проведена доразведка рудных залежей с проходкой канав, восстановлением штольневых горизонтов на залежи № 2, бурением скважин глубиной до 350–400 м. Общие по рудному полю запасы комплексных руд (окисленных + первичных) были увеличены с 275 млн т, по предшествующим данным (табл. 1), до 320 млн т, произведён пересчёт запасов основных и попутных компонентов. Среднее содержание TR_2O_3 по всем рудам составило 1,03 % при бортовом содержании 0,3 %.

Многочисленные выходы комплексных руд «карасугского» типа были обнаружены в районе Карасугского рудного поля Тувинской и Горной экспедициями в 1948–1958 гг., Берёзовским ПГО в 1979–1983 гг. Эти выходы оценены горными работами, они группируются в рудоносных карбонатитовых полях: Чаахольском, Улатайском, Тээли-Оргудыдском, Северо-Чозском, Южно-Чозском, Чайлюхемском (рис. 1). Изученные в этих полях флюорит-барит-железогидроксидные руды уступают по качеству и количеству рудам Карасугского месторождения, но тем не менее могут стать его отдалённым резервом. Наиболее крупным разведанным объектом является Улатайское железорудное месторождение (91 млн т руды), содержащее флюорит в среднем 5,7 %, барит 3,9 %, редкоземельные минералы – бастнезит и паризит (П. В. Коростин и др., 1957).

В 2004–2006 гг. ОАО «Тувинская ГРЭ» (Д. Н. Шаповалов, В. В. Михайлов и др.) на Карасугском месторождении провело ревизионные и оценочные работы на двух крупных рудных залежах (Первой и Второй) с повышенным содержанием редкоземельных металлов. Ставилась задача оконтурить локальный блок богатых легкообогатимых бастнезитовых руд в коре выветривания и оценить прогнозные ресурсы цериевых редкоземель-

ных металлов по категории P_1 до глубины 100 м. Было пройдено 7 бульдозерных траншей глубиной 2,2–4,8 м и общей длиной 1013 м, пробурено 12 скважин колонкового бурения (всего 1441 м). Рядовое опробование по полотну траншей проводилось сплошными бороздами длиной 3 м и сечением 3×5 см. Всего отобрана 251 бороздовая проба. Для оценки технологических свойств руды на Первой залежи отобраны две лабораторные пробы – из траншей (536 кг) и из половинок керна (361 кг). Рядовые бороздовые и керновые пробы анализировались в ЦЛ ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) количественным методом ИСП МС (ICP MS) на 14 редкоземельных элементов (лантаноидов), а также Y, Ba, Sr, U, Th, Mo.

Геология и минералогия месторождения

В районе Центральной Тувы поля рудоносных карбонатитов выстраиваются субмеридиональной цепью на протяжении 120 км, обозначая собой рудоконцентрирующую зону, поперечную основным складчатым и разрывным палеозойским структурам (рис. 1). Радиологический возраст карбонатитов 118 млн лет маркирует этап позднемезозойской тектоно-магматической (внутриплитной рифтогенной) активизации складчатой области [8]. В пределах Карасугского рудного поля на площади около 20 км² разведаны восемь рудоносных карбонатитовых тел первично магматического происхождения (рис. 2) [1, 7]. Тела локализованы преимущественно в зонах субширотных разломов среди сильно трещиноватых, местами брекчированных и осветлённых песчаников и алевролитов ордовик-силурийского возраста. Выделяются два крупных трубообразных тела конически-кольцевого центробежного строения размером в поперечнике 670×750 м (Первое) и 400×550 м (Второе). Остальные тела дайкообразные протяженностью от 300 до 1300 м и мощностью до 100–160 м. Бурением скважин тела прослежены без выклинивания до глубины 300–550 м. Крупные тела многофазовые, сложены анкерит-кальцитовыми карбонатитами первой фазы и флюорит-барит-сидеритовыми второй.

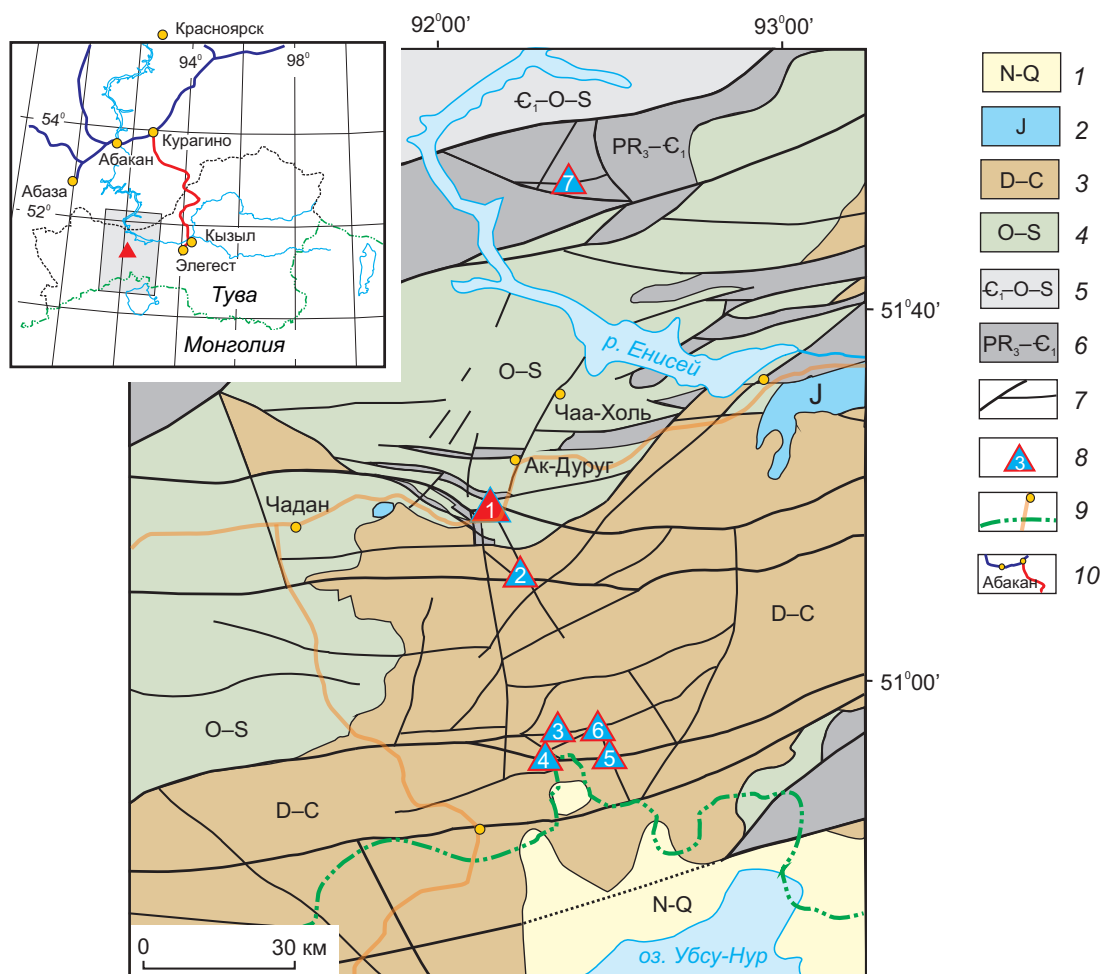


Рис. 1. Геологическая схема района рудоносных карбонатитовых полей в Центральной Туве (составлена с использованием [3]):

1 – неоген-четвертичные рыхлые отложения; 2 – юра: сероцветные песчаники, алевролиты, аргиллиты, угли; 3 – девон–карбон (Тувинский прогиб): вулканогенные и карбонатно-терригенные отложения; 4, 5 – ордовик–силур, карбонатно-терригенные флишоидные отложения: 4 – Хемчикско-Систигхемский прогиб, 5 – Центрально-Западно-Саянский блок; 6 – венд–нижний кембрий: метаморфические сланцы, кварциты, мраморы, метабазиты, офиолиты; 7 – разломы; 8 – рудоносные карбонатитовые поля: Карасугское (1), Чаахольское (2), Тээли-Оргудыдское (3), Улатайское (4), Южно-Чозское (5), Северо-Чозское (6), Чайлюхемское (7); 9 – государственная граница РФ с Монголией (зелёная линия), шоссейная дорога (оранжевая линия) и населённый пункт (кружок); 10 (на вкладке) – железная дорога: действующая (фиолетовая линия) и проектируемая Курагино – Кызыл – Элегест (красная линия)

Fig. 1. Schematic geological map of the ore-bearing carbonatite fields in Central Tuva (compiled using [3]):

1 – Neogene-Quaternary loose deposits; 2 – Jurassic: gray-colored sandstones, siltstones, claystones, and coals; 3 – Devonian–Carboniferous (Tuvian trough): volcanogenic and carbonate-terrigenous deposits; 4, 5 – Ordovician–Silurian, carbonate-terrigenous flyschoid deposits: 4 – Khemchik-Sistighem trough, 5 – Central West Sayan block; 6 – Vend–Lower Cambrian: metamorphic schists, quartzites, marbles, metabasites, ophiolites; 7 – faults; 8 – ore-bearing carbonatite fields: (1) Karasug, (2) Chaakhol, (3) Teeli-Orgudyd, (4) Ulaatai, (5) Southern Choza, (6) Northern Choza, (7) Chailag-Khem; 9 – State border of the Russian Federation with Mongolia (green line), highway (orange line), and a settlement (circle); 10 (insert) – railways: operating (purple line) and planned Kuragino–Kyzyl–Elegest (red line)

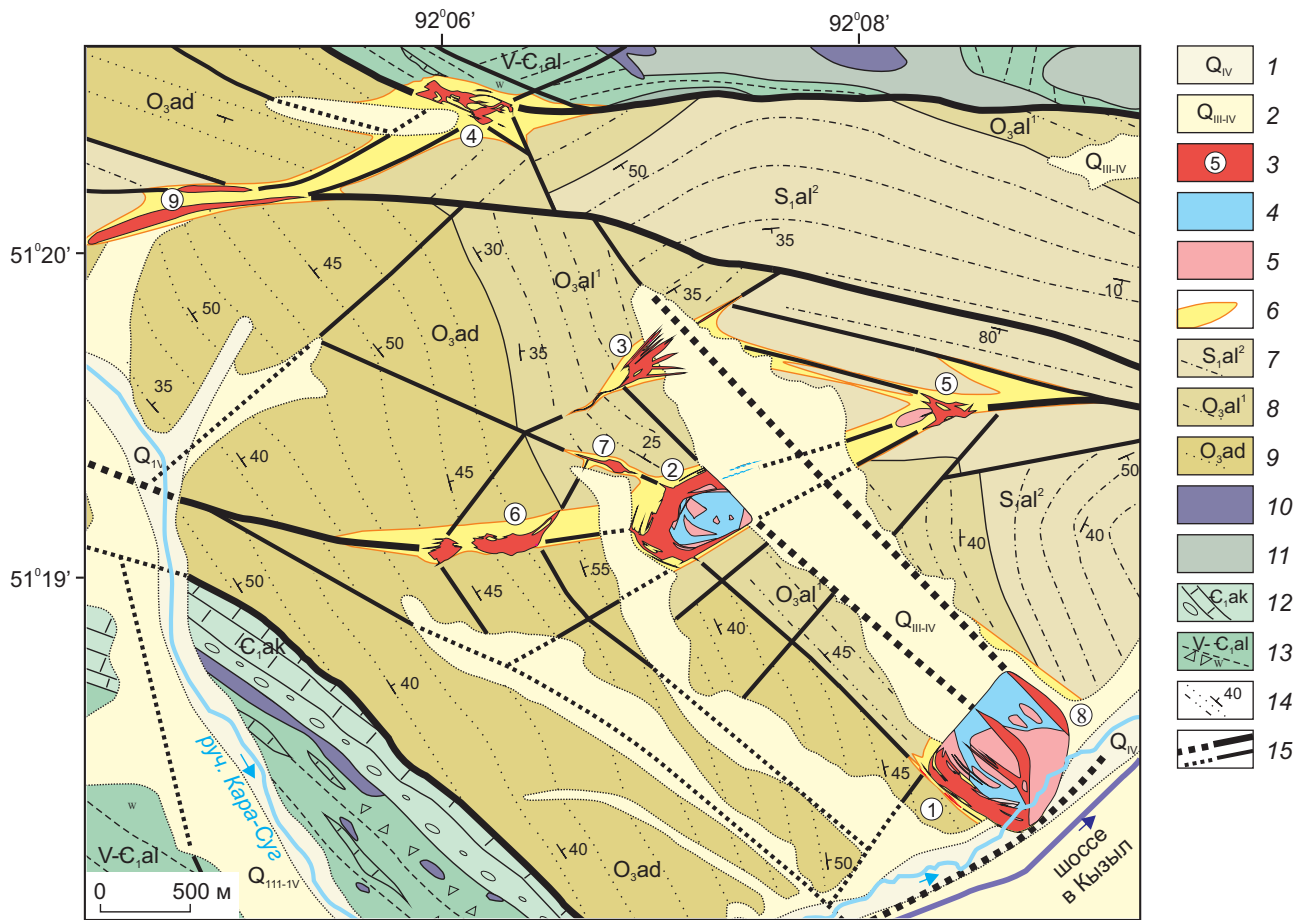


Рис. 2. Геологическая карта Карасугского рудного поля:

1 – современные аллювиальные отложения; 2 – четвертичные делювиально-пролювиальные отложения (сняты на рудных залежах); 3 – рудоносные карбонатитовые тела и их номера (первично флюорит-барит-сидеритовые карбонатиты); 4 – анкерит-кальцитовые карбонатиты; 5 – биотитовые граниты и граносиениты; 6 – зоны подроблённых, осветлённых, лимонитизированных вмещающих терригенных пород; 7 – нижний силур, верхнеалавелькская подсвита: сероцветные песчаники, алевролиты, линзы известняков с фауной брахиопод; 8 – верхний ордовик, нижнеалавелькская подсвита: пестроцветные песчаники и алевролиты; 9 – верхний ордовик, адырташская свита: песчаники и алевролиты; 10 – серпентиниты кембрия (актовракский комплекс); 11 – базиты кембрия; 12 – нижний кембрий, акдуругская свита: известняки с фауной археоциат, конгломераты, песчаники; 13 – венд-нижний кембрий, алтынбулакская свита: кварциты, сланцы, олистострома, линзы известняков; 14 – слоистость пород и элементы её залегания; 15 – разломы

Fig. 2. Geological map of the Karasug ore field:

1 – recent alluvial deposits; 2 – Quaternary deluvial-proluvial deposits (not shown over ore lodes); 3 – ore-bearing carbonatite bodies (primarily fluorite-baryte-siderite carbonatites) and their numbers; 4 – ankerite-calcite carbonatites; 5 – biotite granites, granosyenites; 6 – zones of crushed, bleached, and limonitized terrigenous host rocks; 7 – Lower Silurian, Upper Alaveylyk Subformation: gray-colored sandstones, siltstones, limestone lenses with brachiopods fauna; 8 – Upper Ordovician, Lower Alaveylyk Subformation: variegated sandstones and siltstones; 9 – Upper Ordovician, Adyrtyash Formation: sandstones and siltstones; 10 – Cambrian serpentinites (Aktovrak Suite); 11 – Cambrian basites; 12 – Lower Cambrian, Akdurug Formation: limestones with fauna of archeocyanate, conglomerates, sandstones; 13 – Vendian–Lower Cambrian, Altynbulak Formation: quartzites, schists, olistostroma, limestone lenses; 14 – rock bedding and its attitudes; 15 – faults



Последние имеют наибольшее распространение и практически во всём своём объёме представляют собой комплексные многокомпонентные руды. В строении карбонатитовых тел участвуют крупные останцы подробленных, грейзенизированных и аргиллизированных гранитов. С вмещающими терригенными породами и гранитами карбонатиты имеют резкие субвертикальные (90–70°) контакты. В цементе карбонатитов рассеяны относительно мелкие (1–20 см) угловатые обломки вмещающих алюмосиликатных пород в количестве 5–25 об. %. Встречаются многометровые глыбы и блоки-останцы. На всех карбонатитовых телах проявлена мощная зона гипергенного окисления, формирующая окисленный тип комплексных руд.

Анкерит-кальцитовые карбонатиты представлены белыми среднезернистыми породами, в составе которых (мас. %): кальцит 60–45; анкерит 35–50; апатит 1–2; пирит 0,5–1,5; кварц 1–2; монацит и паризит в сумме 0,5. Спорадически диагностируются мусковит, рутил, магнетит, сидерит, доломит, халькопирит, молибденит, торит. В зоне окисления карбонатиты обращены в гидрогётит-кальцитовые породы буро-жёлтого цвета с прожилками гипергенного стронцианита и кальцита. Низкое содержание железа (7–8 % Fe) и редких земель (0,3 % TR_2O_3), отсутствие барита и флюорита переводят эти карбонатиты в категорию нерудоносных вмещающих пород.

Первично интрузивные флюорит-барит-сидеритовые карбонатиты характеризуются выдержанностью минерального состава, текстуры и структуры в крупных объёмах слагаемых ими залежей. В их средний минеральный состав, в пересчёте из химического, входят (мас. %): сидерит 61; барит (баритоцелестин) 20; флюорит 12; пирит 3; бастнезит 1–1,5; кварц 1–2; апатит 0,5; молибденит 0,03; уранинит 0,02. В сумме до 1 % встречаются мусковит, калиевый полевой шпат, анкерит, магнетит, рутил, монацит. Карбонатиты имеют неравномерно-зернистую порфиридовидную структуру: в тонкозернистой (< 0,2 мм) флюорит-сидеритовой основной массе рассеяны более крупные округло-идiomорфные вкрапленники ромбоэдр-

рического сидерита, кубического флюорита, призматического барита или баритоцелестина, дипирамидального кварца, сложной формы пирита (рис. 3, а). Вкрапленники занимают более половины объёма порфиридовидных агрегатов. Размер кристаллов-вкрапленников 0,3–3 мм, местами до 10 мм. Бастнезит (первой генерации) включён во флюорит-сидеритовый агрегат в форме мелких зёрен и пластинок светло-коричневого цвета размером от 0,04 × 0,1 до 0,5 × 1 мм. Под электронным микроскопом в основной массе диагностируются аксессуарные минералы – монацит размером 0,01–0,03 мм, молибденит и уранинит размером в тысячные доли миллиметра. Уранинит выявляется по радиационным трекам на f -радиографиях (рис. 3, б).

В процессе гипогенного аутометасоматического преобразования флюорит-барит-сидеритовые карбонатиты в значительной части своего объёма в линейных зонах были обогащены гематитом, бастнезитом второй генерации, целестином. Гематит (спекулярит) в форме таблитчатых метакристаллов размером от 0,05 × 0,2 × 0,2 до 1 × 5 × 5 мм рассеян преимущественно в сидерите (рис. 4, а). Бастнезит второй генерации в форме пластинчатых метакристаллов размером до 1 × 5 мм и их сноповидных сростков включён в сидерит и часто во вкрапленники флюорита (рис. 4, б). Целестин развивается по баритоцелестину. Неравномерное распределение в пространстве рудных залежей гематита и стронциевых минералов заставляет подразделять неокисленные комплексные руды на природные типы (разновидности): флюорит-барит-сидеритовый (гематита до 5 %); флюорит-барит-гематит-сидеритовый (гематита 5–30 %); стронциеносный флюорит-баритоцелестин-гематит-сидеритовый – вместо барита содержит баритоцелестин и местами стронцианит. Типы руд названы по главным минералам (более 5 %) в порядке возрастания их количества. Руды всех типов содержат бастнезит, аксессуарные монацит, молибденит, уранинит.

Минералы рудоносных карбонатитов, по данным микрозондовых определений, имеют некоторые особенности в своём химическом

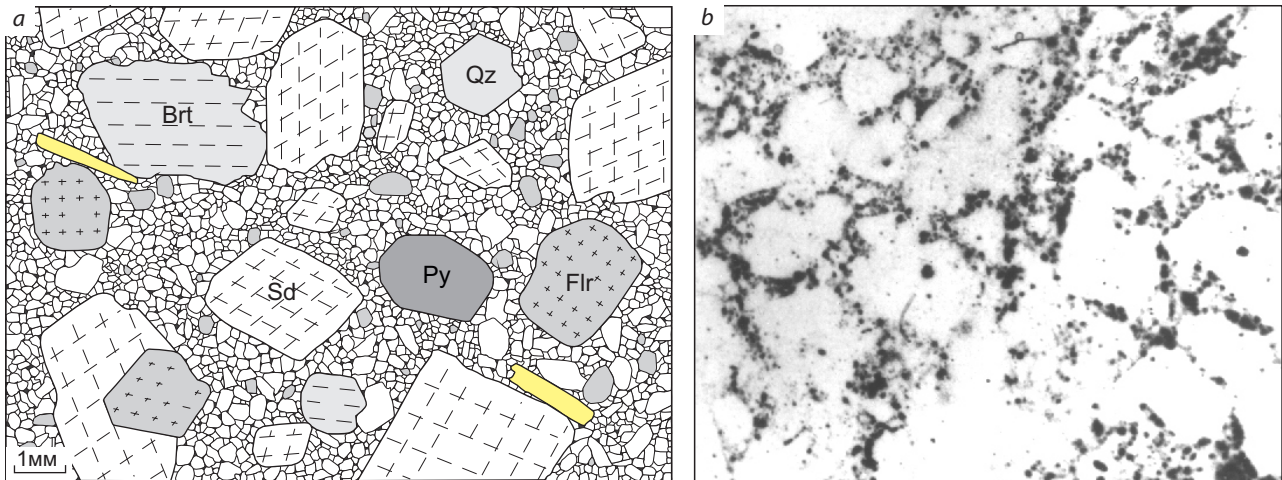


Рис. 3. Порфировидная структура флюорит-барит-сидеритовых карбонатитов (а); *f*-радиография (b) (поле зрения не совпадает с рис. 3 а):

a – во вкрапленниках: Sd – сидерит, Flr – флюорит, Brt – барит, Py – пирит, Qz – кварц, бастнезит (жёлтое); в основной массе аллотриоморфнозернистый флюорит-сидеритовый агрегат; *b* – треки от уранинита (чёрное) тяготеют к основной массе вокруг призматических вкрапленников сидерита и барита (белое)

Fig. 3. (a) Porphyritic structure of fluorite-baryte-siderite carbonatites; (b) F-radiography of the section (the field of view not coincide with Fig. 3 a):

a – phenocrysts: siderite (Sd), fluorite (Flr), baryte (Brt), pyrite (Py), quartz (Qz), bastnaesite (yellow); matrix: allotriomorphic granular fluorite-siderite aggregate; *b* – tracks from uraninite (black) are confined to the matrix around prismatic phenocrysts of siderite and baryte (white)

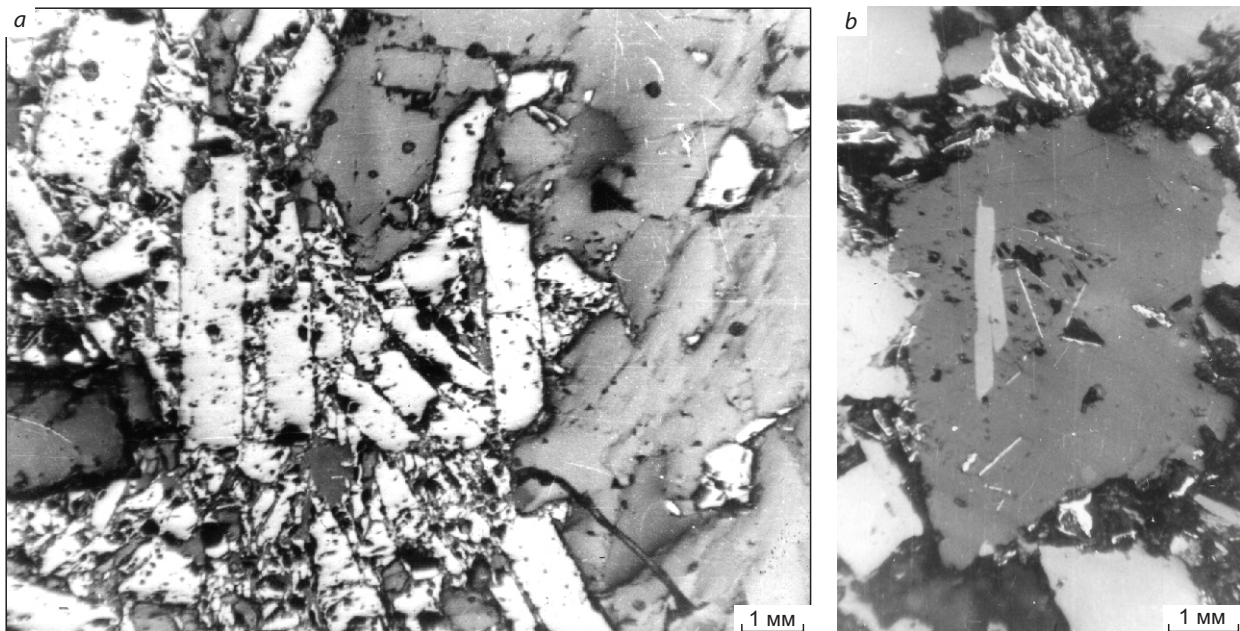
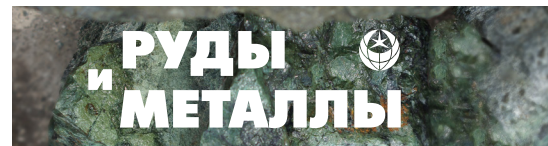


Рис. 4. Скопление таблитчатых метакристаллов гематита (белое) в сидерите (серое) (а); удлинённый метакристалл бастнезита-2 (серое) в порфировом вкрапленнике флюорита (тёмно-серое) (b). Полированные шлифы

Fig. 4. (a) A cluster of tabular hematite metacrysts (white) in siderite (gray); (b) an elongated bastnaesite-2 metacryst (gray) in a fluorite porphyroblast (dark gray). Polished sections



составе [2]. В сидерите FeCO_3 сравнительно невысокое количество примесей (здесь и далее – мас. %): MnO 0,9–1,3; MgO 1,0; CaO 0,7. Во флюорите CaF_2 повышено содержание: TR_2O_3 0,2–0,5; Y_2O_3 0,1; SrO 0,1–0,5. Барит BaSO_4 содержит: SrO 1,0; CaO 0,5. Баритоцелестин (промежуточный минерал в изоморфном ряду барит – целестин) содержит: SrSO_4 46–62; BaSO_4 52–35; CaSO_4 1–4. В бастнезите TRCO_3F сравнительно немного радиоактивных элементов: ThO_2 0,3–0,6; UO_2 0,07. Судя по f -радиографиям, торий и уран распределены в бастнезите равномерно, что указывает на изоморфный характер их примеси.

Окисленные руды

Первичные комплексные руды имеют легко окисляемую сидеритовую основу. В разных залежах на глубину от 100 до 300 м от дневной поверхности в доолигоценое время они были окислены с формированием структуры «железной шляпы» (рис. 5, 6). Переход от «шляпы» к первичным рудам происходит через маломощную (2–5 м) подзону полуокисленных руд. В зоне окисления сидерит и пирит практически полностью замещены гидроксидами железа (агрегатом гётита и гидрогётита). По сидериту образуются псевдоморфозы ячеистопористого сложения (рис. 7). Это приводит к резкому увеличению пористости окисленных руд до 20–25 об. % (пористость первичных руд 5–8 об. %). Естественная влажность окисленных руд 2,3 %, средний объёмный вес 2,70 т/м³. Лёгкая окисляемость сидерита с одновременным появлением крупной пористости способствовали глубокому проникновению зоны окисления в рудные залежи. Зона окисления при этом не сопровождалась корой выветривания в форме существенного глинистого изменения вмещающих алюмосиликатных пород.

По форме и цвету гидроксидов железа выделяются псевдоморфные буровато-чёрные гётитовые руды и жёлто-бурые лимонитовые. Последние являются продуктом более интенсивной гидратации гётитовых руд во вторую стадию гипергенеза. Весьма характерно появление в лимонитовых рудах вторичной пористости с чередованием рыхлых и плотных

агрегатов гидрогётита (по механизму колец Лизеганга). В окисленных рудах почти без изменений сохраняются флюорит, барит, бастнезит, гематит, кварц, апатит, монацит, ксенолиты вмещающих пород. Бастнезит чаще всего включён в агрегаты гидроксидов железа, его вростки также наблюдаются по периферии и внутри зёрен флюорита. В лимонитовых рудах на месте зёрен бастнезита местами наблюдается порошкообразный агрегат гипергенного бастнезита или рабдофанита. Баритоцелестин нередко подвержен выщелачиванию вплоть до образования остаточных псевдоморфоз тонкопористого барита. Молибденит замещается молибдитом. Уранинит исчезает, а уран рассеивается в массе гидроксидов железа.

Вариации в минеральном составе первичных руд наследуются в окисленных рудах и обуславливают выделение разных природных типов. Выделяются: 1) флюорит-барит-гётитовый тип – руды буровато-чёрного цвета с рядовым содержанием (мас. %) барита 12–22, флюорита 6–15, гематита 3–7, TR_2O_3 0,5–1,5 и SrO 0,2–2,0; 2) флюорит-барит-гематит-гётитовый тип – руды буровато-чёрного цвета с гематитом 10–30 %, повышенным содержанием TR_2O_3 1,5–2,5 % и рядовым содержанием барита, флюорита, SrO ; 3) флюорит-барит-лимонитовый тип – руды жёлто-бурого цвета с порошковатыми и плотными натёчными агрегатами гидрогётита, с рядовым содержанием флюорита, барита, TR_2O_3 , SrO ; 4) флюорит-баритоцелестин-гематит-гётитовый тип – руды буровато-чёрного цвета с гематитом 10–30 %, TR_2O_3 1,5–2,5 %, отличаются наличием баритоцелестина и целестина (вместо барита), поэтому содержат SrO от 2 до 35 %. Во всех типах руд 15–25 % их массы составляют кварц и минералы в обломках алюмосиликатных пород (полевые шпаты, слюды, кварц, каолинит, рутил). В окисленных рудах в агрегате гидроксидов железа от первичных руд наследуется рассеянный характер и относительно крупный размер (0,3–10 мм) вкрапленников барита, баритоцелестина, флюорита, бастнезита, гематита. Это благоприятствует применению механических методов для раскрытия и получения минеральных концентратов при обогащении руд.

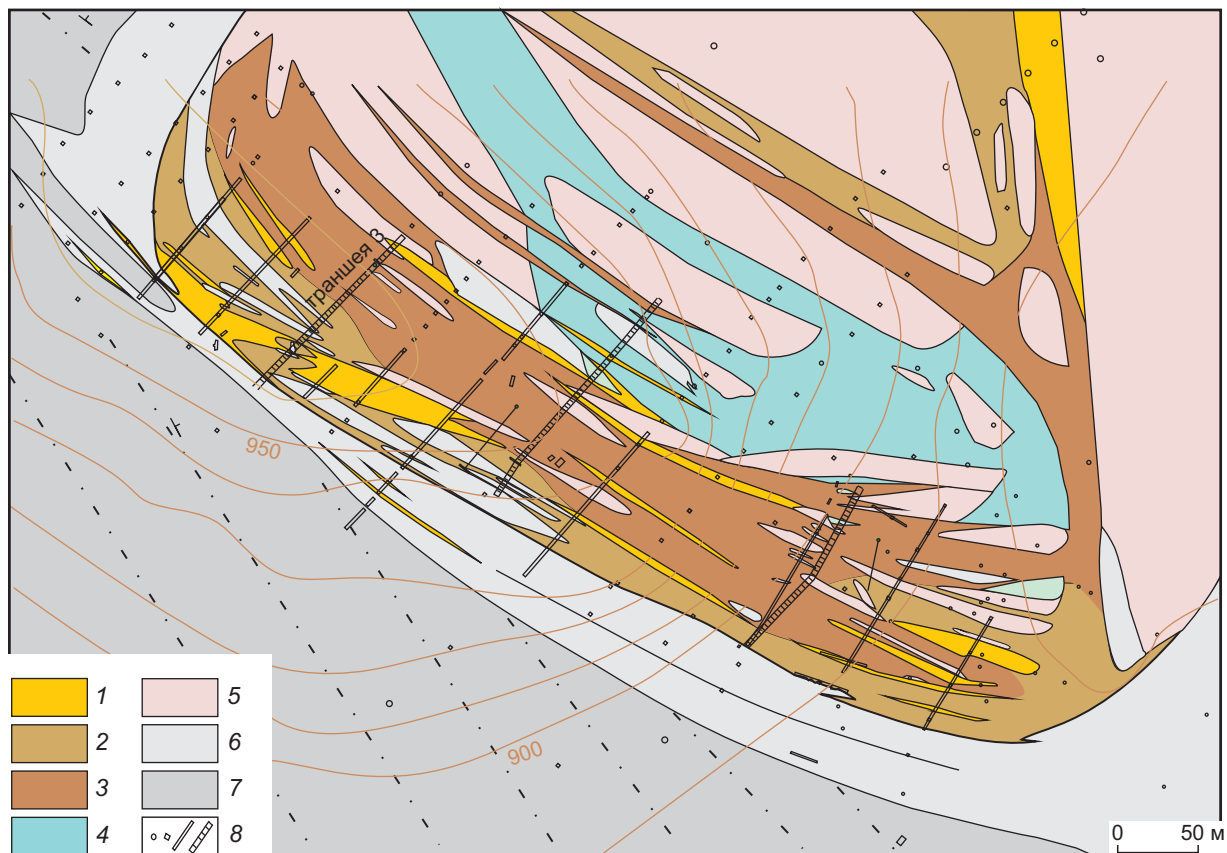


Рис. 5. Геологический план Первой рудной залежи (составлен с использованием материалов Горной экспедиции 1954, Берёзовского ПГО 1983, Тувинской ГРЭ 2005 гг.):

1–3 – окисленные руды: 1 – флюорит-барит-лимонитовая, 2 – флюорит-барит-гётитовая, 3 – флюорит-баритоцелестин-гематит-гётитовая; 4 – гидрогётит-кальцитовая порода (окисленный анкерит-кальцитовый карбонатит); 5 – гранитоиды брекчированные и грейзенизированные; 6 – песчаники и алевролиты интенсивно трещиноватые и брекчированные, осветлённые (серицитизированные); 7 – песчаники и алевролиты первично зелёно-серые и красно-серые; 8 – разведочные выработки (скважина, шурф, канава, траншея ТГРЭ 2005 г. с интервалами бороздовых проб)

Fig. 5. Geological plan of the Pervaya ore lode (compiled using data from the Gornaya Expedition (1954), Beryozovskiy PGO (1983), and Tuvinian GRE (2005)):

1–3 – oxidized ores: 1 – fluorite-baryte-limonite, 2 – fluorite-baryte-goethite, 3 – fluorite-barytocelestine-hematite-goethite; 4 – hydrogoethite-calcite rock (oxidized ankerite-calcite carbonatite); 5 – brecciated and greisenized granitoids; 6 – sandstones and siltstones intensely fractured and brecciated, bleached (sericitized); 7 – sandstones and siltstones primarily green-gray and red-gray; 8 – exploration workings (borehole, pit, ditch, and trench, made by the TGRE in 2005, with the channel sampling intervals)

«Богатый» блок первой очереди

В результате ревизионных и оценочных работ 2004–2006 гг. Тувинской ГРЭ с использованием фондовых материалов предшественников на Первой рудной залежи выделен в качестве первоочередного объекта в случае разработки месторождения «богатый» по содержанию РЗМ блок окисленной комплексной

руды. Он оконтурен по бортовому содержанию TR_2O_3 1,5 % с максимальным содержанием в рядовых пробах до 3,1 %. Размер блока 415 × 50 м, глубина 100 м. В нём подсчитаны прогнозные ресурсы цериевых редких земель категории P_1 в количестве 115 тыс. т со средним содержанием TR_2O_3 2,13 % и объёмным весом руды 2,6 т/м³ (протокол апробации ИМГРЭ

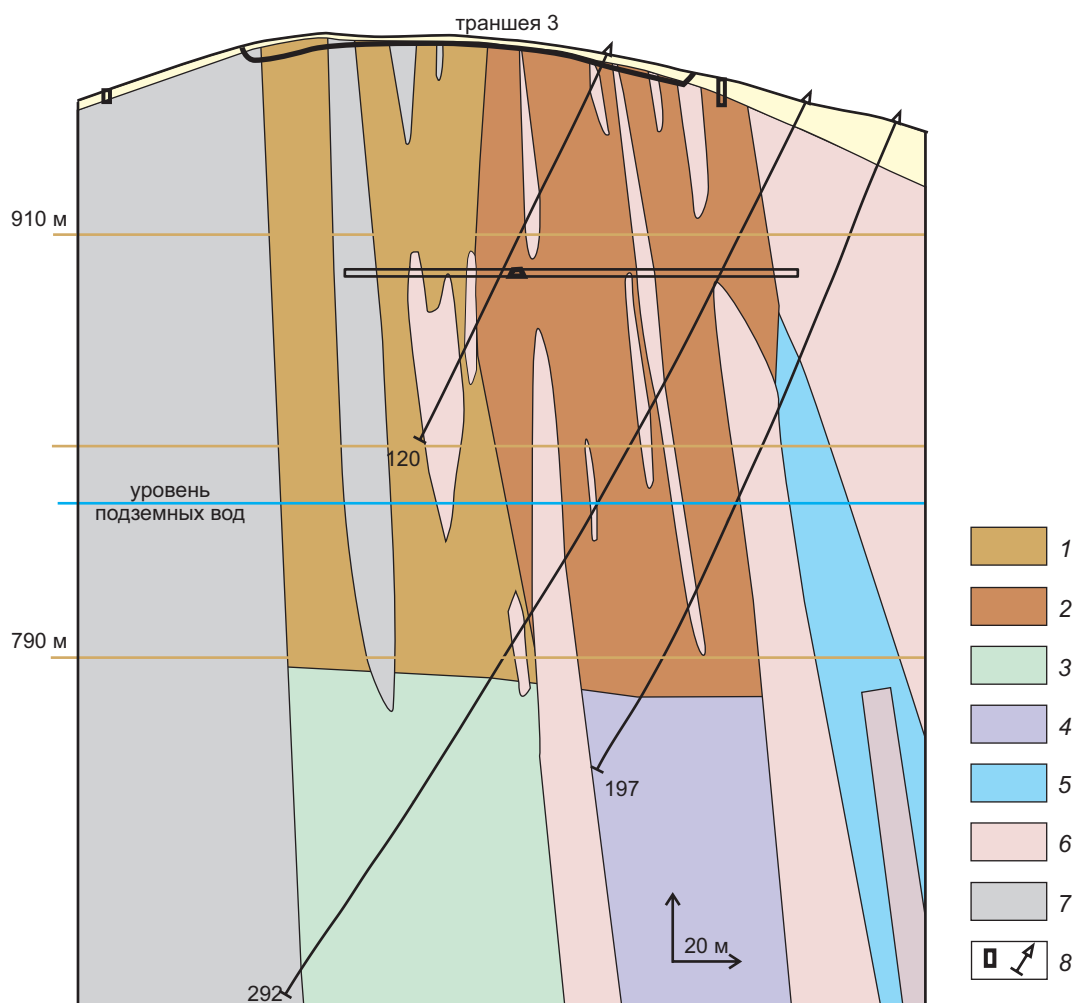


Рис. 6. Разрез по линии траншеи 3 на Первой рудной залежи:

1, 2 – окисленные руды («железная шляпа»): 1 – флюорит-барит-гётитовая, 2 – флюорит-баритоцелестин-гематит-гётитовая; 3, 4 – первичные руды: 3 – флюорит-барит-сидеритовая, 4 – флюорит-баритоцелестин-гематит-сидеритовая; 5 – анкерит-кальцитовый карбонатит; 6 – граниты, 7 – песчаники и алевролиты; 8 – горные выработки и скважины

Fig. 6. Section along the Trench 3 at the Pervaya ore lode:

1, 2 – oxidized ores ("iron hat"): 1 – fluorite-baryte-goethite, 2 – fluorite-barytocelestine-hematite-goethite; 3, 4 – primary ores: 3 – fluorite-baryte-siderite, 4 – fluorite-barytocelestine-hematite-siderite; 5 – ankerite-calcite carbonatite; 6 – granites, 7 – sandstones and siltstones; 8 – mining workings and boreholes

№ 10 от 20.12.2006). Комплексная руда в «богатом» блоке представлена преимущественно флюорит-баритоцелестин-гематит-гётитовым типом (рис. 8).

В средний химический состав руды в блоке входят (мас. %): SrSO_4 25,5; BaSO_4 14,0; Y 0,020; Th 0,010; U 0,003; Mo 0,028. На уровне кларковых фоновых концентраций в рудах

определяются Cu, Pb, Zn, Co, Ni, Cr, Sc, V, Nb, Ta, Zr, Hf, Be, Li, Cs. Средний минеральный состав блока (мас. %): гётит 13; гидрогётит 11; гематит 11; баритоцелестин 27; Ва-целестин 11; барит 2; флюорит 6; бастнезит 2,3; монацит 0,2; апатит 0,5; кварц 7; полевые шпаты 4; слюды 3. В отдельных находках диагностировались реликтовые минералы – молибденит, уранинит,

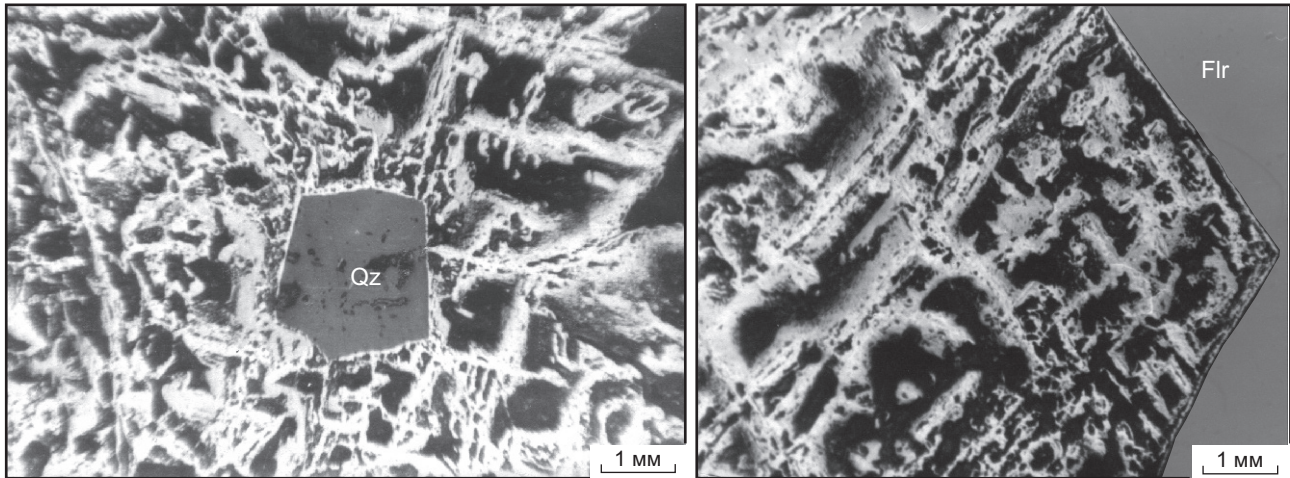


Рис. 7. Гётит-гидрогётитовые ячейисто-пористые псевдоморфозы по сидериту: гидроксиды железа (светло-серое), кварц (Qz), флюорит (Flr), пустоты (чёрное). Полированные шлифы

Fig. 7. Goethite-hydrogoethite cellular-porous pseudomorphs after siderite: iron hydroxides (goethite-hydrogoethite) (light gray), quartz (Qz), and fluorite (Flr); voids (black). Polished thin sections

торианит, торит, ксенотим. Среди новообразованных гипергенных минералов, кроме гётита, гидрогётита, гидрогематита, определяются малораспространённые: лепидокрокит, ферригидрит, ярозит, гидроксиды марганца, рабдофанит, молибдит, урановые слюдки, малахит, стронцианит, кальцит, галлуазит, каолинит. Отличительной чертой «богатого» блока, помимо повышенного содержания РЗО, является высокое содержание баритоцелестина и целестина (в сумме 38 %), пониженное содержание флюорита (6 %). В целом для окисленных руд месторождения содержание урана оценивается в 0,019 % (табл. 1), что обуславливает естественную радиоактивность на обнажённой поверхности рудных залежей на уровне до 40–50 мкР/час. Экологически благоприятным качеством «богатого» блока является минимальное по месторождению содержание урана (0,003 %) и тория (0,01 %).

Рассчитанный поминеральный баланс РЗО в рудах (отн. %): бастнезит – 90; монацит – 5,5; флюорит и гидроксиды железа – 4,5. Средний химический состав бастнезита (мас. %): La_2O_3 21,2; Ce_2O_3 35,2; Nd_2O_3 9,7; остальные РЗО 6,0; Y_2O_3 0,5; ThO_2 0,5; UO_2 0,07; CaO 0,4; SrO 0,5; BaO 0,6; SO_3 0,4. По соотношению индивидуальных редкоземельных элементов руды Карасугского месторождения характеризуются

резким преобладанием элементов цериевой группы (лёгких лантаноидов от лантана до неодима). Это типично для бастнезитовых месторождений мира, таких как Маунтин-Пасс в США, Баюнь-Обо (Баян-Обо) в Китае (табл. 2). Следует обратить внимание на флюорит Карасугского месторождения: он содержит в среднем TR_2O_3 0,4 %, Y_2O_3 0,15 % и отличается аномальной обогащённостью средними и тяжёлыми лантаноидами (от самария до лютеция), суммарная доля которых 35 отн. %. Технологическая возможность извлечения из карасугского флюорита особо ценных иттриевых РЗМ требует изучения.

Технологические исследования руд

Технологические исследования обогатимости руд Карасугского месторождения проводились в каждом из трёх периодов геолого-разведочных работ. В первом периоде в институтах ВИМС (г. Москва; Г. А. Смелянская, О. И. Хонина, Л. В. Зверев, 1950) и «Механообр» (г. Ленинград; В. И. Выменец, Ф. С. Исаева, 1959; Б. М. Лакота, 1961) была разработана магнитно-флотационная схема получения железного, флюоритового и баритового концентратов, стронциевого продукта, из металлургического шлака извлекались уран и редкие земли.

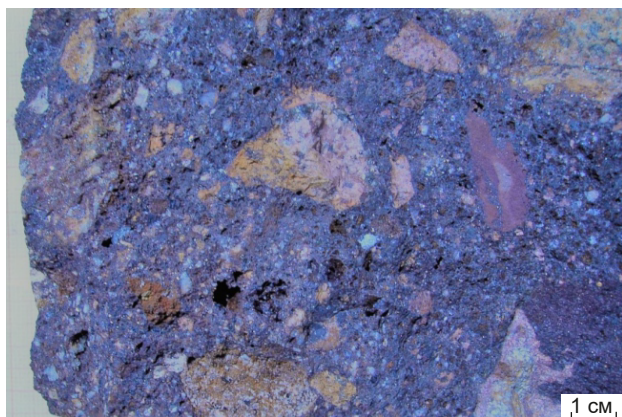


Рис. 8. Флюорит-баритоцелестин-гематит-гётитовая руда с угловатыми обломками гранитов: образец половинки керна (скважина № 3 – 119 м)

Fig. 8. Fluorite-barytocelestine-hematite-goethite ore with angular fragments of granites. Half-core sample (Borehole No. 3 – 119 m)

В 1979–1983 гг. в ВИМС (В. Е. Лифиренко, Н. В. Петрова, Э. П. Николаева и др., 1983) были изучены лабораторные технологические пробы – пять проб окисленных и две пробы неокисленных руд со Второй рудной залежи. Была также отобрана опытно-промышленная проба окисленных руд, которая осталась неисследованной. В результате изучения лабораторных проб разработаны схемы переработки первичных и окисленных комплексных руд на основе магнитно-флотационного механического обогащения с последующей химико-металлургической переработкой продуктов [4]. Из окисленных руд получены кондиционные концентраты – железный для металлургического передела, баритовый (утяжелитель буровых растворов и для химической промышленности), флюоритовый марки ФФ-90, бастнезитовый и кварц-полевошпатовый со слюдой. Получены также химические продукты – полирит (порошкообразный полирующий материал с содержанием 98 % TR_2O_3), азотнокислый барий, азотнокислый стронций, плавиковая кислота, парамолибдат аммония, урановый продукт. Извлечение урана в отдельный продукт одновременно очищает от его вредной примеси остальные продукты и концентраты. Проведённые технико-экономические расчёты (Ю. А. Соколовский, Л. В. Пи-

рогова, Л. П. Каташова, 1983) на то время показали рентабельность возможного предприятия при условии реализации всего комплекса извлекаемых полезных компонентов.

В 2004–2006 гг. в ВИМС на двух лабораторных пробах из «богатого» блока Первой залежи проведено дальнейшее исследование обогатимости окисленных руд. Уточнена комбинированная технологическая схема, состоящая из операций рудоподготовки (дробление, измельчение, классификация, обесшламливание), магнитной сепарации и флотации. Определена оптимальная крупность дробления исходной руды для максимального раскрытия рудных минералов – 0,3 мм. Подтверждено, что в качестве товарных продуктов возможно получение железного концентрата различных сортов, флюоритового и баритового (баритоцелестинового) концентратов, кварц-полевошпатового продукта. Достигнуто извлечение редких земель в количестве 56,6 % в бастнезитовый концентрат. Благоприятным качеством исследованных руд является достаточно низкое содержание урана в технологических пробах – 0,0039 % – и в целом в «богатом» блоке – 0,003 %. Невысоко и содержание тория – соответственно 0,011 % и 0,010 %. Показана неэффективность применения методов гравитационного обогащения и перспективность магнитных методов для выделения железных концентратов различного сорта.

Запасы и прогнозные ресурсы

Запасы и ресурсы комплексных руд и отдельных компонентов на Карасугском месторождении оценивались неоднократно с разной степенью достоверности. По последней оценке, прогнозные ресурсы РЗО в целом по окисленным и первичным рудам по всему рудному полю приняты по категории P_2 в количестве: руды – 370 млн т; суммы РЗО (TR_2O_3) – 3,7 млн т со средним содержанием 1,0 % (протокол ИМГРЭ № 10 от 20.12.2006). При предполагаемой производительности рудника до 300 тыс. т руды в год (до 3–6 тыс. т суммы РЗО) указанных прогнозных ресурсов хватит на тысячу лет. Этот временной фактор отодвигает практическое внимание к первичным рудам на далёкое будущее. На исторически

Табл. 2. Состав редких земель в мировых месторождениях (лантаноиды, отн. %)

Table 2. Composition of rare earths in world mineral deposits (lanthanides, rel. %)

Месторождения	TR ₂ O ₃ , мас. %	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Сумма
Карасуг, «богатый» блок, РЗМ	2,13	30,9	48,8	4,3	12,8	1,35	0,37	0,97	0,08	0,27	0,03	0,08	0,01	0,06	0,006	100
Карасуг, флюорит, РЗМ	0,4	9,5	26,2	6,8	22,4	5,4	3	7	1,5	10,5	1,6	2,5	0,5	2,5	0,6	100
Томтор, уч. Буранный, РЗО	10,6	20,8	50,4	4,48	17,36	2	0,64	2	0,16	1,2	0,16	0,32	0,08	0,32	0,08	100
Баюнь-Обо, РЗО	3–5,4	27	50	5	15	1,1	0,2	0,4	0,1	0,1						98,9
Маунтин-Пасс, РЗМ	8,8	30	53	4	12	0,6	0,12	0,22	0,01		0,004		0,001	0,005		99,96

обозримый период для перспективной оценки редкоземельности Карасугского месторождения можно ограничиться подсчитанными запасами окисленной комплексной руды, причём только залежей № 1, 2 и 3, в которых повышено среднее валовое содержание суммы РЗО: 1,15; 1,19 и 1,32 % (табл. 1 и 3).

Запасы руды в трёх залежах составляют 70 млн т, средневзвешенное содержание суммы РЗО – 1,20 %, количество РЗО – 0,84 млн т. Из этого количества можно выбрать блоки со средним содержанием РЗО около 2,0 %. Один такой «богатый» блок с содержанием РЗО 2,13 % и ресурсами 115 тыс. т выделен на Первой рудной залежи. На Второй залежи в 1980 г. Берёзовским ПГО отбирались технологические пробы с содержанием РЗО 1,84 % (проба 1К), 1,79 % (6К) и 1,92 % (8К). На участках отбора этих проб возможно локализовать блоки с более высоким содержанием РЗО. Запасы других компонентов окисленных руд стоит рассматривать в объёме тех же 70 млн т руды (табл. 3). Рассчитанные запасы BaSO₄ 11,4 млн т, CaF₂ 6,8 млн т и SrO 1,8 млн т относятся к категории весьма крупных. Для сравнения отметим, что крупнейшее в РФ месторождение барита Кварцитовая Сопка имеет запасы 5,3 млн т, крупнейшее флюоритовое месторождение Вознесенское – 4,9 млн т, крупное целестиновое Мазуевское месторождение – 1,77 млн т SrO.

Приблизительная стоимостная оценка извлекаемых из руд Карасугского месторождения полезных продуктов показывает, что около половины стоимости приходится на неразделённый редкоземельный продукт (полирит, мишметалл или бастнезитовый концентрат). Другая половина приходится на железный, баритовый, флюоритовый концентраты, ценные химические соединения F, Ba, Sr, Mo, U. Это означает, что с учётом пересчёта попутных компонентов на основной компонент условное содержание в руде суммы РЗО достигает не менее 4 %.

Горнотехнические и гидрогеологические условия

Горнотехнические условия Карасугского месторождения для открытой разработки окисленных руд простые. Большинство рудных залежей (№ 1, 2, 4, 5, 6) слагают холмы обнажённых на дневной поверхности руд. Делювиальный слой мощностью до 3 м представлен в основном рудными обломками в лимонит-глинистом цементе. В начальный период разработки можно практически избежать попадания в контур карьера пустых боковых пород. Внутри рудных залежей крупные блоки алюмосиликатных пород легко опознаются визуально по внешним признакам, поэтому пустые блоки размером более 1 м могут быть селективно извлечены и помещены в отвал.

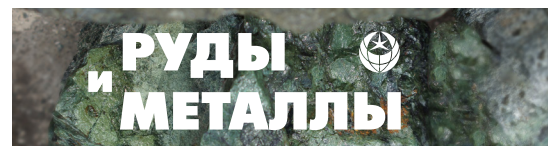


Табл. 3. Химический состав и запасы окисленных руд в залежах 1, 2 и 3 (из данных Горной экспедиции, см. табл. 1)

Table 3. Chemical composition and reserves of oxidized ores in the lodes 1, 2, and 3 (based on data by the Gornaya Expedition, see Table 1)

Рудные залежи №	1	2	3	Среднее, %	Запасы, млн т
Руда, млн т	25,18	31,88	12,59		70
Компоненты, мас. %:					
Fe валовое	28,36	30,03	32,36	29,8	20,9
BaSO ₄	12,31	17,66	20,70	16,3	11,4
CaF ₂	6,62	11,39	11,50	9,7	6,8
SrO	2,46	2,01	4,15	2,6	1,8
TR ₂ O ₃ (сумма PЗO)	1,15	1,19	1,32	1,2	0,84
S валовая	3,24	2,73	3,10	3,0	
MnO	0,295	0,675	0,255	0,46	
P	0,151	0,112	0,100	0,12	
TiO ₂	0,18		0,195	0,10	
SiO ₂	15,44	11,82	8,44	12,5	
Al ₂ O ₃	3,46	5,92	3,06	4,5	
Mo	0,045	0,025	0,020	0,03	

Разграничение рудных типов по содержанию гематита, флюорита, сульфатов также возможно по визуальному наблюдению, что сведёт к минимуму опробование при эксплуатационной разведке. Окисленные руды всех разновидностей в бортах траншей и керне скважин сохраняют крепость и устойчивость (рис. 8), вместе с тем они сравнительно легко поддаются экскавации бульдозером. В этой связи не ожидается применение буровзрывных работ при добыче.

Гидрогеологические условия на Первой и Второй залежах весьма простые (Д. Н. Шаповалов и др., 2006). По наблюдениям в скважинах, уровень безнапорных трещинных вод залегает ниже 100 м – дна предполагаемого карьера на стадии полной отработки окисленных руд. Водоприток, включая метеорные воды, ожидается слабый, воды будут уходить свободной фильтрацией через дно карьера в нижележащий водоносный горизонт. Подземные воды в контуре рудных залежей сульфатно-гидрокарбонатного состава, неагрессивные. Из нормируемых для питьевых вод показателей повышенным содержанием относительно предельно допустимой концентрации (ПДК) отличаются: железо общее (до 0,7 мг/л; до 2,3 ПДК), фтор (от 0,2 до 1,8 мг/л; до 1,2 ПДК) и марганец

(до 0,3 мг/л; до 3 ПДК). На несколько порядков ниже ПДК в водах определялись U, Sr, Ba, Mo, Cr, Co, Zn, Cu, Pb, Cd, Ni. Для технических целей можно использовать любые подземные воды на участке разработки. Для хозяйственно-питьевого водоснабжения в летний период подходят также поверхностные воды ручья Кара-Суг (зимой промерзают до дна). Разработка карьера не внесёт существенных изменений в гидрохимическую обстановку на участке по сравнению с существующим состоянием естественного выхода руд на дневной поверхности.

Месторождение расположено в холмистой степной зоне. В 1,5 км от месторождения на залесённом склоне хребта Западного Танну-Ола возможна лесозаготовка лиственницы для ограниченных технических целей. Для отопления вахтового посёлка может быть использован добываемый в 27 км бурый уголь из Чаданского разреза. Климат в районе (село Ак-Дуруг) отличается тёплым летом (среднесуточная температура 14...17 °С) и не слишком суровой зимой (-21...-23 °С). Среднегодовая температура -1,4 °С. Среднегодовые осадки 53 мм, выпадают в летний период. Климат позволяет проводить работы на месторождении круглогодично.

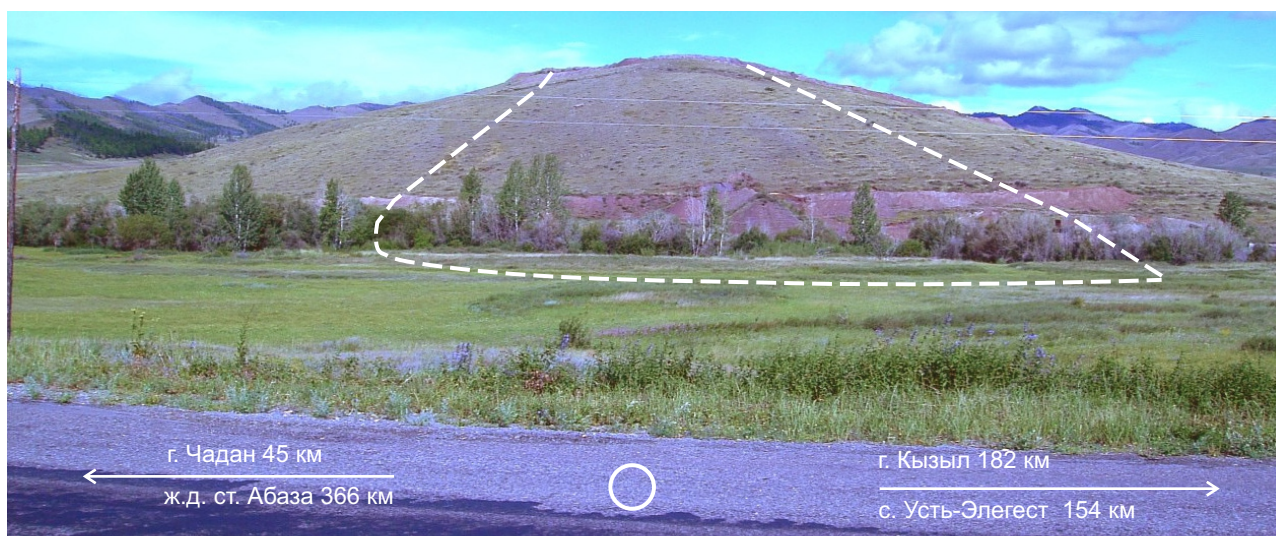


Рис. 9. Вид на Первую рудную залежь (пунктирная линия) с шоссе Кызыл – Абаза (фото автора, 2005 год)

Fig. 9. View of the Pervaya ore lode (dotted line) from the Kyzyl-Abaza highway (photo by the author, taken in 2005)

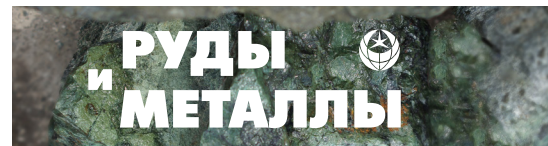
В верховье ручья Кара-Суг находится известный местному населению источник лечебных питьевых вод (аржаан). От будущего карьера источник удалён на 3,5 км и может быть использован в прежнем режиме. Благоприятным экологическим фактором для жителей района является удалённость мест их постоянного проживания на 12–29 км от карьера.

Географо-инфраструктурные условия

Сведения о развитии инфраструктурной обстановки в регионе взяты из различных интернет-источников. Перспективы промышленного освоения многих минеральных объектов Тувы зависят от прокладки в республику железной дороги. Строительство такой дороги уже началось в 2011 г., когда был уложен первый километр пути около города Кызыл. Затем проект был отложен, но в последнее время в средствах массовой информации возобновилась дискуссия о необходимости дороги. Проектом предусмотрено строительство ответвления от станции Курагино Красноярской железной дороги до города Кызыл (411 км) и далее до посёлка Элегест, где расположены угольные месторождения (см. вставку на рис. 1). Крупнейшее из них – Элегестское – со-

держит около 900 млн т балансовых запасов качественного коксующегося угля марки «Ж». Планируемый объём грузоперевозок – 15 млн т в год. Прорабатывается вопрос о продолжении дороги в Монголию и Китай.

Грядущая прокладка железной дороги в Туву актуализирует вопрос о геолого-экономической переоценке объектов минерально-сырьевой базы республики. Карасугское месторождение расположено в центральной части республики в Чаа-Хольском муниципальном районе (кожууне). Строительство железной дороги облегчит связь месторождения с основными металлургическими центрами юга Сибири – городами Абакан (697 км по линии Карасуг – Кызыл – Курагино – Абакан) и далее Красноярск (от Карасуга 828 км), Новокузнецк (961 км), Кемерово (1275 км), Новосибирск (1480 км). Если, как планируется, железная дорога будет доведена до посёлка Элегест, то от него до Карасугского месторождения остаётся 154 км по асфальтовой дороге Р-257 (рис. 9). На той же дороге находятся ближайшие населённые пункты: село Ак-Дуруг (12 км; население 1,3 тыс. человек), село Чаа-Холь (29 км; 3,3 тыс. чел.), город Чадан (45 км; 9,7 тыс. чел.). Следовательно, недостатка в местной рабочей силе не предвидится. К тому же



многие жители имеют опыт долголетней разработки Чаданского бурогоугольного разреза.

Решается в республике и проблема энергодефицита. Тува получает электроэнергию по двум магистральным линиям электропередачи напряжением 220 кВ из Хакасии (Абаза – Ак-Довурак – Чадан) и Красноярского края (Ергаки – Туран – Кызыл). В 2015 г. «Россети ФСК ЕЭС» построила новую магистраль Кызыл – Чадан, соединив обе линии в энергокольцо, что увеличило максимально допустимый переток мощности в энергосистему Тувы до 240 МВт. ЛЭП-220 вместе с автомобильным шоссе проходят в трёхстах метрах от Первой рудной залежи Карасугского месторождения (рис. 9).

Комплексный состав карасугских руд делает некорректной оценку их качества по содержанию отдельных компонентов. Важно, что в сумме промышленно ценные минералы (гидроксиды железа, гематит, Ва-Sr-сульфаты, флюорит, бастнезит) составляют не менее 80 мас. %. Более того, получаемый при переработке руд флотационный кварц-слюдистополевошпатовый продукт предложено использовать как керамическое сырьё [4]. Цифра 80 % классифицирует комплексные руды как весьма богатые. Такие руды допускают транспортировку на переработку в южносибирские промышленные центры без существенного увеличения транспортных расходов по сравнению с обогащением руды на месте добычи в Туве и последующей транспортировкой продуктов в сибирские центры, тем более что там находятся и потенциальные потребители продуктов переработки комплексных руд. На базе карасугского рудника возможна организация крупнокускового дробления руды и её погрузка в транспортируемые герметичные контейнеры.

Томтор или Карасуг

Томторское месторождение многими рассматривается как главный в нашей стране источник редкоземельных металлов на исторически долгий срок. Выдающимся качеством этого месторождения является высокое среднее содержание на разведанном Буранном участке редких земель – 12,5 % TR_2O_3 – и ни-

обия – 6,7 % Nb_2O_5 . Запасы РЗО крупные – 3233 тыс. т. Их хватит на несколько сотен лет разработки. Но этот фактор может стать значимым только через много десятков лет по исчерпанию рентабельных запасов Карасугского месторождения в случае его освоения. В этом свете не имеют значения и «колоссальные» общие прогнозные ресурсы Томторского района – TR_2O_3 153,7 млн т и Nb_2O_5 73,6 млн т [9]: дело до них дойдёт нескоро.

Содержание (относительная доля) индивидуальных металлов в неразделённой сумме редкоземельных металлов на сравниваемых объектах приведено в таблице 2. На Карасуге спектр РЗМ примерно такой же, как и на бастнезитовых месторождениях Баюнь-Обо и Маунтин-Пасс. Карасуг уступает Томтору по доле наиболее дорогостоящих «тяжёлых» (иттриевой группы) индивидуальных РЗМ. Впрочем, раздельное получение индивидуальных РЗМ – это самостоятельная технологическая проблема, которая решается на специализированном предприятии. Редкоземельные продукты обогащения любого из месторождений для последующего разделения подлежат поставке на такое стороннее предприятие.

По остальным важным показателям Томтор значительно уступает Карасугу. На текущий момент нет окончательной ясности с технологией переработки томторской руды. Редкие земли находятся в форме фосфатных минералов – крандаллита и монацита. Руды исключительно трудны в обогащении из-за полиминерального состава и тонкодисперсного сложения, исключающего получение мономинеральных концентратов. Очень сложно и раздельное гидрометаллургическое извлечение компонентов. Высокое содержание в фосфатных рудах радиоактивных элементов, урана (0,01 % U) и особенно тория (0,15 % ThO_2) создаёт экологическую проблему на всех стадиях добычи, транспортировки, переработки руды и захоронения отходов [5]. На Карасуге содержание радиоактивных элементов в «богатом» блоке на порядок ниже – 0,003 % U и 0,010 % ThO_2 , и в концентратах других компонентов содержание этих «вредных» элементов находится в допустимых нормах пределах.

На Томторе на Буранном участке пластовая рудная залежь мощностью от 0,2 до 42 м перекрыта чехлом пустых и сильно увлажнённых осадочных пород мощностью от 7,5 до 160 м. Участок находится в условиях сплошной многолетней мерзлоты глубиной более 165 м [5]. В таких условиях потребуются большой объём вскрышных работ в мёрзлых породах. Работы в карьере предполагается вести с октября по апрель в холодное и тёмное время года, а в остальные месяцы придётся поддерживать функционирование предприятия без добычи руды.

В районе Томторского месторождения почти полностью отсутствует транспортная и энергетическая инфраструктура. В 630 км находится посёлок и замерзающий морской порт Хатанга. Материально-техническое и любое другое обеспечение работ возможно лишь завозом по Северному морскому пути (СМП) до Хатанги и затем по зимнику до месторождения. Обратным путём вывоз необогащённой руды предполагается по СМП до порта на Дальнем Востоке и далее железной дорогой до города Краснокаменска в Забайкальском крае. Там предполагается строительство гидromеталлургического завода с мощностью по переработке руды до 160 тыс. т в год [5]. В гораздо более простых логистических условиях находится Карасугское месторождение.

Различны и социально-экономические последствия освоения месторождений. На Томторе это ожидаемые трудности с поиском и обустройством рабочих кадров для полугодовой работы вахтовым методом в условиях заполярного климата. На Карасуге же это высокооплачиваемая работа для многих местных жителей в полчасе езды от дома служебным транспортом. Что касается расширения налоговой базы, то Республике Тыва, одному из наиболее дотационных регионов России, оно необходимо даже более, чем Республике Саха (Якутия).

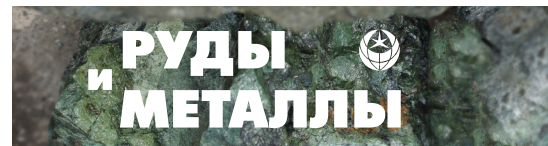
Заключение

Карасугское месторождение заключает в себе многокомпонентные U-Mo-Fe-F-Ba-Sr-TR руды, которые более чем на 80 % сложены про-

мышленными минералами. Запасы редких земель, стронция, барита, флюорита относятся к категории крупных. Разработана принципиальная технологическая схема переработки руд с получением широкого ассортимента продуктов: бастнезитовый концентрат, полирит или мишметалл, железный, баритовый и флюоритовый концентраты, химические соединения фтора, бария, стронция, молибдена, урана. Все компоненты востребованы в нашей стране. Из них частично импортируются из-за рубежа: барит и уран – из Казахстана, флюорит – из Монголии, редкоземельные металлы и стронций – из Китая. Избыток стронция в некоторых типах руд Карасугского месторождения в форме баритоцелестина может быть утилизирован в составе баритового концентрата в качестве бурового утяжелителя.

Карасугское месторождение находится в простых для открытой отработки горнотехнических и гидрогеологических условиях. Месторождение связано шоссейной дорогой и линией электропередач с городом Кызыл. Прокладка в Туву запроектированной железной дороги значительно облегчит транспортную связь с южно-сибирскими металлургическими центрами. В таких условиях Карасугское месторождение, в случае его вовлечения в эксплуатацию, будет иметь много конкурентных преимуществ перед другими редкоземельными объектами РФ. Это надо учитывать при разработке планов промышленного освоения таких месторождений, как Томтор, Чуктукон, Белая Зима, Катугино, Ловозеро.

Труднообогащаемые фосфатные руды Томторского месторождения залегают в сложных горно-геологических условиях, затраты на их добычу и переработку велики по сравнению с легкообогащаемыми бастнезитовыми рудами китайского месторождения Баюнь-Обо (запасы TR_2O_3 40 млн т, содержание 3–5,4 %). Следовательно, добываемые на Томторе редкоземельные металлы по рентабельности не смогут быть конкурентоспособными на мировом рынке. Их задача будет ограничена удовлетворением внутренних потребностей РФ, а с этим вполне справится и Карасугское месторождение.



Для более аргументированного суждения о промышленных перспективах Карасугского месторождения необходима углублённая многовариантная геолого-экономическая оценка всего комплекса условий, в которых находится

объект. Оценка должна включать вариант с постройкой железной дороги в Республику Тыва. Оба проекта – Карасуг и железная дорога – могут поддерживать друг друга в своём экономическом и социальном обосновании.

Список литературы

1. Болонин А. В., Кайкова Т. М., Комарницкий Г. М. О карбонатитовой природе комплексного железо-флюорит-барит-редкоземельного месторождения // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1984. – № 3. – С. 59–64.
2. Болонин А. В., Никифоров А. В. Химический состав минералов карбонатитов Карасугского месторождения в Туве // Геология рудных месторождений. – 2004. – Т. 46, № 5. – С. 427–443.
3. Геологическая карта Тувинской АССР, масштаб 1 : 500 000 / гл. ред. Подкаменный А. А., Шерман М. Л. – Министерство геологии СССР, 1983.
4. Лифиренко В. Е., Башлыкова Т. В., Николаева Э. П., Спирина И. С. Флотационное обогащение окисленных редкоземельных фтор-стронций-барий-железных руд / Флотационные реагенты. – М. : Наука, 1986. – С. 116–120.
5. Матвеев А. И., Толстов А. В., Петров И. М. Схема создания редкометалльного кластера в Республике Саха (Якутия). – DOI : 10.31242/2618-9712-2025-30-1-7-27 // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2025. – № 30 (1). – С. 7–27.
6. Митропольский А. С. Гидротермальные комплексные железорудные месторождения / Железорудные месторождения Алтае-Саянской складчатой области. – М. : Изд-во АН СССР, 1959. – Т. 1, кн. 2. – С. 498–511.
7. Никифоров А. В., Болонин А. В., Покровский Б. Г., Сугоракова А. М., Чугаев А. В., Лыхин Д. А. Геохимия изотопов (O, C, S, Sr) и Rb-Sr возраст карбонатитов Центральной Тувы // Геология рудных месторождений. – 2006. – Т. 48, № 4. – С. 296–319.
8. Никифоров А. В., Болонин А. В., Сугоракова А. М. и др. Карбонатиты Центральной Тувы: геологическое строение, минеральный и химический состав // Геология рудных месторождений. – 2005. – Т. 47, № 4. – С. 360–382.
9. Похиленко Н. П., Афанасьев В. П., Толстов А. В., Крук Н. Н., Похиленко Л. Н., Иванова О. А. Перспективы развития и проблемы освоения сырьевой базы дефицитных стратегических видов твердых полезных ископаемых Сибири. – DOI : 10.31857/S0016777023050088, EDN: YONCHO // Геология рудных месторождений. – 2023. – Т. 65, № 5. – С. 476–492.

References

1. Bolonin A. V., Kaikova T. M., Komarnitskii G. M. O karbonatitovoi prirode kompleksnogo zhelezoflyuorit-barit-redkozemel'nogo mestorozhdeniya [On the carbonatite nature of a complex iron-fluorite-barite-rare earth deposit], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka* [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], 1984, No 3, pp. 59–64. (In Russ.)
2. Bolonin A. V., Nikiforov A. V. Khimicheskii sostav mineralov karbonatitov Karasugskogo mestorozhdeniya v Tuve [Chemical composition of minerals of carbonatites of the Karasug deposit in Tuva], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 2004, V. 46, No 5, pp. 427–443. (In Russ.)
3. Geologicheskaya karta Tuvinskoi ASSR, masshtab 1 : 500 000, gl. red. Podkamennyi A. A., Sherman M. L. [Geological map of the Tuva ASSR, scale 1 : 500,000, eds. Podkamennyi A. A., Sherman M. L.], Ministerstvo geologii SSSR [USSR Ministry of Geology Publ.], 1983.
4. Lifirenko V. E., Bashlykova T. V., Nikolaeva E. P., Spirina I. S. Flotatsionnoe obogashchenie oksislenykh redkozemelnykh fluor-strontsiy-barij-zheleznykh rud [Flotation enrichment of oxidized rare earth fluorine-strontium-barium-iron ores]. In : Flotatsionnye reagenty [Flotation reagents], Moscow, Nauka Publ., 1986, pp. 116–120.
5. Matveev A. I., Tolstov A. V., Petrov I. M. Skhema sozdaniya redkometall'nogo klastera v Respublike Sakha (Yakutiya) [Scheme of creation of rare metal cluster in the Sakha Republic (Yakutia)], *Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики* [Natural

- resources of the Arctic and Subarctic*], 2025, No 30 (1), pp. 7–27. (In Russ.) DOI: 10.31242/2618-9712-2025-30-1-7-27.
6. Mitropol'skii A. S. Gidrotermal'nye kompleksnye zhelezorudnye mestorozhdeniya [Hydrothermal complex iron ore deposits]. In: Zhelezorudnye mestorozhdeniya Altae-Sayanskoi skladchatoi oblasti [Iron ore deposits of the Altai-Sayan folded region], Moscow, Izdatel'stvo AN SSSR [USSR Academy of Sciences Publ], 1959, V. 1, book 2, pp. 498–511.
 7. Nikiforov A. V., Bolonin A. V., Pokrovskii B. G., Sugorakova A. M., Chugaev A. V., Lykhin D. A. Geokhimiya izotopov (O, C, S, Sr) i Rb-Sr vozrast karbonatitov Tsentral'noi Tuvy [Geochemistry of isotopes (O, C, S, Sr) and Rb-Sr age of carbonates of Central Tuva], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 2006, V. 48, No 4, pp. 296–319. (In Russ.)
 8. Nikiforov A. V., Bolonin A. V., Sugorakova A. M. et al. Karbonatity Tsentral'noi Tuvy: geologicheskoe stroenie, mineral'nyi i khimicheskii sostav [Carbonates of Central Tuva: geological structure, mineral and chemical composition], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 2005, V. 47, No 4, pp. 360–382. (In Russ.)
 9. Pokhilenko N. P., Afanas'ev V. P., Tolstov A. V., Kruk N. N., Pokhilenko L. N., Ivanova O. A. Perspektivy razvitiya i problemy osvoeniya syr'evoi bazy defitsitnykh strategicheskikh vidov tverdykh poleznykh iskopaemykh Sibiri [Development prospects and problems of developing the raw material base of scarce strategic types of solid minerals in Siberia], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 2023, V. 65, No 5, pp. 476–492. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0016777023050088, EDN: YOHCCHO.

Болонин Александр Васильевич (bolonin@tsnigri.ru)

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва, Россия

Alexandr Vasilievich Bolonin

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher

Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals (FSBU TsNIGRI), Moscow, Russia