

–0,010+0 мм, т.е. практически не обогащаемом материале.

В целом минералогические особенности бобово-конгломератовых руд являются неблагоприятными для методов глубокого обогащения, однако текстурно-структурные особенности руды (высокая дисперсность подавляющей части руды, неоднородность, сложные взаимоотношения минералов, обусловленные развитием вторичных текстур и структур, наличие трещин усыхания и пр.) свидетельствуют о возможности прямой металлургической переработки.

Полученные данные были использованы при составлении технологической части ТЭО временных кондиций и отчета с подсчетом запасов железных руд Серовского месторождения, прошедшие защиту в ГКЗ в 2016 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аликберов, В.М. Об инвестиционной привлекательности железорудных месторождений нераспределенного фонда недр / В.М. Аликберов, Е.С. Броницкая, Б.И. Пирогов, Л.П. Тигунов, Е.В. Зублюк // Разведка и охрана недр. — 2013. — № 2 — С. 57–61.
2. Астахова, Ю.М. Минералогические особенности слоистых силикатов железных руд Серовского месторождения, влияющие на их обогатимость / Ю.М. Астахова, Е.М. Сорокин, Е.Г. Ожогина, Ю.Н. Шувалова // Сб. трудов «Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья» (Плаксинские чтения — 2014). — 2014 — С. 84–85.
3. Вторушин, А.В. Вещественный состав и происхождение хромистых железных руд Серовского района / А.В. Вторушин, Н.А. Егорова // Тр. Свердловского горного ин-та. — 1961. — Вып. 38. — С. 67–93.

4. Иванова, М.В. Особенности раскрытия минералов железа в рудах Серовского месторождения / М.В. Иванова, Ю.М. Астахова, Е.М. Сорокин, Е.С. Броницкая, Е.Г. Ожогина // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 3. — С. 37–41.

5. Иванова, М.В. Минералогические факторы, влияющие на выбор оптимальных методов переработки комплексных железных руд Серовского месторождения / М.В. Иванова, Ю.М. Астахова, Е.С. Броницкая, С.И. Ануфриева, В.М. Ермолов // Сб. мат. IV-ой конференции «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: ФЕРРОСПЛАВЫ» «НИОКР-2018». Екатеринбург, 2018. — С. 161–164.

6. Иванова, М.В. Технологические решения при разработке схем обогащения железных руд на основе минералогических данных / М.В. Иванова // Сб. статей по материалам докладов X Российского семинара по технологической минералогии. — Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2016. — С. 76–81.

7. Кононова, Л.И. Геологический отчет с подсчетом запасов по Серовскому месторождению бобово-конгломератовых и охристых железных руд по состоянию разведанности на 1 июня 1960 г. / Л.И. Кононова, А.А. Шестакова, Б.М. Суздалов — Уралгеолфонд, пос. Рудничный, 1960. — 201 с.

8. Сорокин, Е.М. Минералого-технологические особенности железных руд Серовского месторождения / Е.М. Сорокин, Ю.М. Астахова, И.Г. Быстров., М.В. Иванова, Е.Г. Ожогина, В.В. Ружицкий, О.А. Якушина // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН, Петрозаводск, 2015. — № 1(241) — С. 18–23.

© Коллектив авторов, 2019

Кыдзы Маргарита Валерьевна // margo\_898989@mail.ru  
Астахова Юлия Михайловна // astachova\_j@mail.ru  
Броницкая Елена Сергеевна // vims@df.ru  
Ануфриева Светлана Ивановна // anufrieva.05@mail.ru  
Гришаев Георгий Сергеевич // zhoric89@mail.ru

## УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

УДК 552.332:622.1; 571.56:338.984

Слепцов А.П.<sup>1</sup>, Толстов А.В.<sup>2</sup>, Томашев А.В.<sup>3</sup>, Самсонов Н.Ю.<sup>2</sup>, Баранов Л.Н.<sup>4</sup> (1 — АО «Якутск-геология», 2 — НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО), 3 — ФГБУ «ВИМС», 4 — ИГМ СО РАН)

### НОВОЕ В МЕТОДИКЕ ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РУД (НА ПРИМЕРЕ ТОМТОРСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ)

Представлен новый подход к подсчету запасов комплексных редкоземельных руд Северного и Южного участков Томторского рудного поля, выполненный по результатам оценочных работ, проведенных ГУГПП РС(Я) «Якутскгеология» в 2015–2016 гг. Разработаны новые научно-методические компоненты для подсчета запасов редкоземельных руд участков Северный и Южный по четырем вариантам бортового содержания с учетом перевода полезных компонентов в условный ниобий ( $Nb_2O_{3\text{усл}}$ ) при регулировании различных геолого-промышленных параметров исходной руды. Получены результаты повариантного подсчета запасов редкоземельных руд Северного и Южного участков Томторского рудного поля. Выполнены соответствующие технико-

экономические расчеты для ТЭО временных разведочных кондиций. **Ключевые слова:** запасы, редкоземельные металлы, Томторское рудное поле, технико-экономическое обоснование.

Sleptsov A.P.<sup>1</sup>, Tolstov A.V.<sup>2</sup>, Tomashev A.V.<sup>3</sup>, Samsonov N.Yu.<sup>2</sup>, Baranov L.N.<sup>4</sup> (1 — Yakutskgeology, 2 — Research and Exploration Enterprise — ALROSA, 3 — VIMS, 4 — IGM SB RAS)

### NEW APPROACHES IN THE METHOD OF COUNTING MULTI-COMPONENT ORE RESERVES (ON THE EXAMPLE OF THE TOMTOR ORE FIELD)

A new approach to calculating the reserves of complex rare-earth ores of the Northern and Southern sections of the Tomtor ore field, carried out according to the results of the assessment work carried out by the Yakutskgeology in 2015–2016, is presented. New scientific and methodological components have been developed for estimating reserves of rare-earth ores in the North and South sections of four on-board content based on the conversion of useful components into conditional niobium ( $Nb_2O_3$ ) while regulating various geological and industrial parameters of the original ore. The results of an optional calculation of the reserves of rare-earth ores in the Northern and Southern sections of the Tomtor ore field are obtained. The corresponding technical and economic calcula-

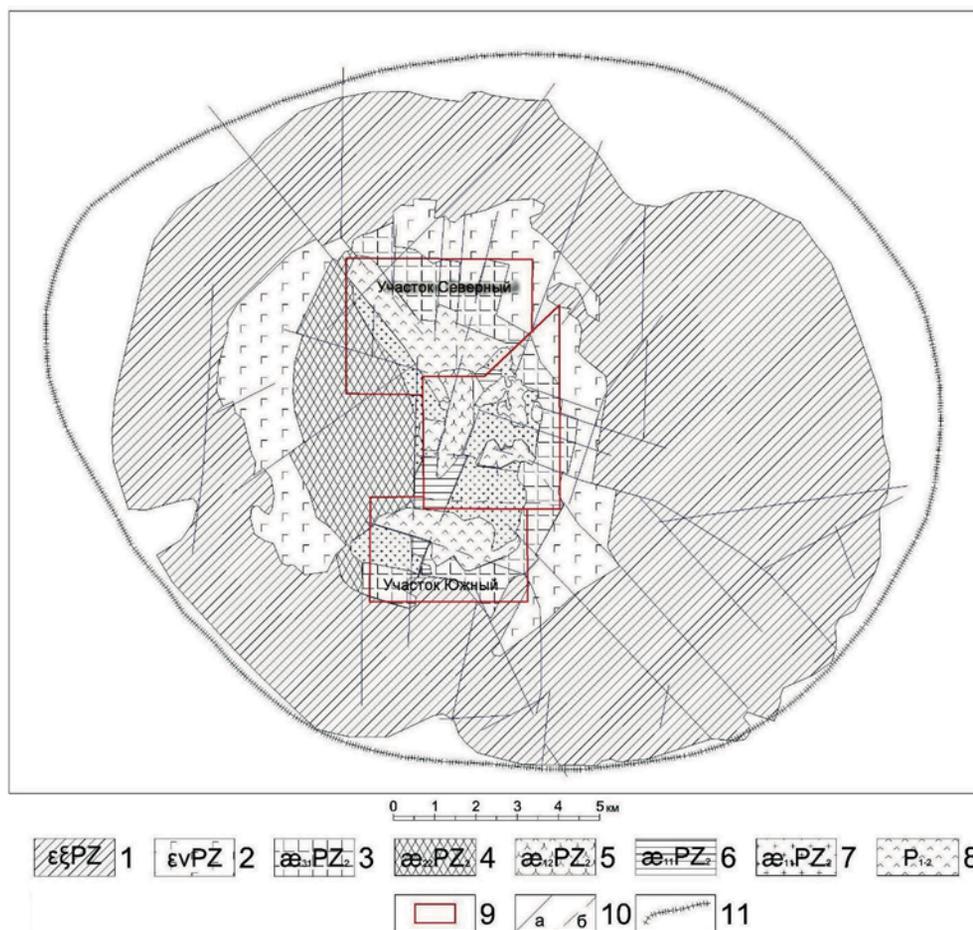
tions for the feasibility study of temporary exploration standards have been carried out. **Keywords:** reserves, rare earth metals, Tomtor ore field, feasibility study.

В основу оконтуривания и подсчета запасов основной залежи комплексных редкоземельных (ТР) пироксенов-монацит-крандаллитовых (ПМК) руд положены результаты оценочных работ, выполненных ГУГПП РС(Я) «Якутскгеология» в пределах Томторского рудного поля в 2015–2016 гг. [3, 5, 11, 12] (рис. 1). Данные поисково-оценочных работ используются как дополнительные, поскольку скважины, пробуренные ранее (1985–1990 гг.), опробованы только на  $Nb_2O_5$ , что не позволяет оценить все элементы, содержащиеся в комплексных рудах [1, 2, 4, 5, 8].

**Обоснование параметров условий для подсчета запасов.** Полезными компонентами товарной продукции в ПМК являются:  $Nb_2O_5$ ,  $Sc_2O_3$ ,  $TR_2O_3$  ( $La_2O_3$ ,  $CeO_2$ ,  $Nd_2O_3$ ,  $Pr_2O_3$ ,  $Sm_2O_3$ ,  $Eu_2O_3$ ) +  $Y_2O_3$  [4, 6]. Индивидуальные оксиды оцениваются в составе  $TR_2O_3$ , кроме этого в карбонат  $TR_2O_3$  выделяется  $Y_2O_3$ . Поскольку при обосновании условий рассматривались различ-

ные варианты выпуска товарной продукции, в том числе коллективный концентрат ТР, разделение индивидуальных оксидов из  $TR_2O_3$  на основные (ТР) и попутные компоненты (P, Al, V, Ti) нецелесообразно [6, 7, 9]. Вместе с тем, экономические расчеты показывают, что освоение Томторского месторождения может быть рентабельным при условии реализации основной товарной продукции высокой степени передела (редких металлов, их оксидов или других соединений) и значительной части попутной [1, 2, 10]. Соответственно возможность отнесения компонентов к попутным и извлекаемым с положительной экономической эффективностью, как и расширение спектра полезных компонентов, требует проведения специальных исследований на последующих стадиях работ [5, 6, 8]. При этом должно учитываться, что специфика отечественных собственно редкометалльных месторождений — огромные запасы при удаленности большинства объектов от развитых инфраструктур, высокая комплексность руд и их трудная обогатимость [2, 11].

**Выбор бортового содержания условного компонента.** Доли полезных компонентов в стоимости товарной



**Рис. 1. Карта-схема домезозойских образований Томторского рудного поля:** 1 — нефелиновые и щелочные сиениты; 2 — ультрамафиты и фойдолиты (породы пироксеного ряда); 3 — апатит-микроклин-сланцевые породы; 4 — карбонаты безредные (кальцитовые и доломит-кальцитовые); 5 — карбонаты редкометалльные (анкеритовые); 6 — анкерит-шамазитовые породы; 7 — карбонаты фосфорно-редкометалльные (полиминеральные); 8 — пермская система, нижний-верхний отделы нерасчлененные. Песчаники, алевролиты, гравелиты, конгломераты, угли; 9 — контур участков Северный, Южный и Бураный; 10 — тектонические нарушения; а) достоверные, б) предполагаемые; 11 — границы массива Томтор по данным магниторазведки

продукции (на 2016 г.) составляют (%):  $Nb_2O_5$ —18,9,  $\Sigma TR$  — 65,7,  $Sc_2O_3$ —14,6. При расчете минимального промышленного, минимального содержания в краевой выработке и бортового содержания для многокомпонентных руд, согласно «Методическим рекомендациям по ТЭО условий для подсчета запасов месторождений твердых полезных ископаемых (кроме углей и горючих сланцев)», используется «условный металл». Несмотря на максимальную долю  $\Sigma TR$  в стоимости товарной продукции (65,7 %), все полезные компоненты приводились к условному  $Nb_2O_5$  исходя из следующих факторов:

- стабильность цены на Nb и волатильность цен TR;
- «балансовая проблема», при которой спектр металлов, удельные вес и соотношение в добываемой руде не соответствуют структуре спроса, что вызывает на рынке профицит легких РЗМ (La и Ce) и дефицит средней и тяжелой групп;
- низкая стоимость основной доли ТР (Ce группы), которая реально может

**Таблица 1**  
**Коэффициенты пересчета металлов в оксиды по пробе «ТЕХПР К-1»**

Компонент	Содержание металла в композитной пробе, %	Коэффициент перевода металла в оксид	Содержание оксида в композитной пробе, %	Запасы полезного компонента в 1 кг руды композитной пробы, кг
Пентаоксид ниобия, Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	—	—	1,202	0,0120
Оксид скандия, Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,011	1,534	0,017	0,0002
Оксид лантана, La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,310	1,173	2,709	0,0271
Оксид церия, CeO <sub>2</sub>	3,800	1,171	4,451	0,0445
Оксид празеодима, Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,370	1,170	0,433	0,0043
Оксид неодима, Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,200	1,166	1,400	0,0140
Оксид самария, Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,130	1,160	0,151	0,0015
Оксид европия, Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,032	1,158	0,037	0,0004
Оксид иттрия, Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,140	1,270	0,178	0,0018

**Таблица 2**  
**Извлечение полезных компонентов из 1 кг руды композитной пробы**

Наименование компонента	Сквозное извлечение по данным технологических испытаний, %	Запасы полезного компонента в 1 кг руды пробы, кг	Извлекаемое количество компонента из 1 кг руды пробы, кг
Пентаоксид ниобия, Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	83,5	0,0120	0,0100
Оксид скандия, Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50,0	0,0002	0,0001
Оксид лантана, La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	78,0	0,0271	0,0211
Оксид церия, CeO <sub>2</sub>	78,0	0,0445	0,0347
Оксид празеодима, Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	78,0	0,0043	0,0034
Оксид неодима, Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	78,0	0,0140	0,0109
Оксид самария, Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	78,0	0,0015	0,0012
Оксид европия, Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	78,0	0,0004	0,0003
Сумма РЗЭ, ΣTR*	78,0	0,0918	0,0716
Оксид иттрия, Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	78,0	0,0018	0,0014

\*в сумме РЗЭ участвуют индивидуальные оксиды, являющиеся товарной продукцией, за исключением Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

реализовываться лишь по цене ниже себестоимости (2–4 долл. США за кг);

— редкометалльные месторождения традиционно оконтуриваются по условному Nb;

— при апробации запасов участка «Буранный» в ГКЗ в 1999 г. экспертами было рекомендовано оконтуривание рудных тел именно по условному Nb.

Испытания химического состава композитной пробы «ТЕХПР К-1» весом 25 кг установили соответствующие содержания металлов в руде. На основании относительных атомных весов элементов и их оксидов вычислены коэффициенты перевода металлов в оксиды. Содержание Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> изначально установлено в оксидной форме (табл. 1).

По результатам технологических испытаний получены данные по сквозному извлечению полезных компонентов из руды. Рассчитано извлекаемое количество полезных компонентов из 1 кг руды композитной пробы.

На основе данных по извлечению полезного компонента из 1 кг руды композитной пробы и стоимости 1 кг полезного компонента рассчитана доля каждого компонента в общей стоимости продукции.

Средняя стоимость 1 кг полезного компонента рассчитана на основе данных за 2014–2015 гг., курс доллара в расчетах принят равным 65 руб./USD.

Доля Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в общей стоимости товарной продукции является максимальной — 29,4 %. Высокая зависимость цены и изменчивость цены от объема закупочной партии неодима (котировки дают ориентир для начальной цены), особые требования к технологическим характеристикам продукта со стороны покупателя-заказчика в настоящее время не позволяют принять его как главный компонент при расчете переводных коэффициентов. В качестве главного компонента принят Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> с долей в стоимости товарной продукции 18,9 %. Коэффициенты приведения к условному Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub><sub>усл.</sub> рассчитывались отдельно для индивидуальных оксидов, однако результаты расчета Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub><sub>усл.</sub> аналогичны результатам при определении коэффициента для «суммы редких», который составляет 0,45. Расчет условного компонента через коэффици-

циенты приведения индивидуальных оксидов позволяет повысить точность вычислений (избежать излишнего округления). Кроме того, наиболее достоверные данные о стоимости полезных компонентов доступны только для индивидуальных оксидов TR.

**Расчетная формула** для приведения содержаний *i*-го компонента к условному содержанию главного (1-го) компонента имеет следующий вид:

$$K_{\text{перевод}} = \frac{C_i \times I_i}{C_1 \times I_1},$$

где: C<sub>*i*</sub> — цена единицы товарного металла, извлекаемого из *i*-го компонента руды, руб./кг; C<sub>1</sub> — цена единицы товарного металла главного компонента, руб./кг; I<sub>*i*</sub> — сквозное извлечение *i*-го компонента (с учетом извлечения при обогащении и металлургическом переделе), доли ед.; I<sub>1</sub> — сквозное извлечение главного компонента (с учетом извлечения при обогащении и металлургическом переделе), доли ед.

**Расчет значения переводного коэффициента** показан на примере перевода содержания Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в содержание Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub><sub>усл.</sub>:

**Таблица 3**  
**Расчет доли полезных компонентов в стоимости товарной продукции**

Товарная продукция	Источник данных о стоимости 1 кг полезного компонента	Средняя стоимость 1 кг за 2014–2015 гг., долл. США	Средняя стоимость 1 кг за 2014–2015 гг., руб.	Кол-во компонента из 1 кг руды пробы, кг	Стоимость компонента в 1 кг пробы, руб.	Доля компонента в стоимости продукции, %
<b>Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>Asianmetal.com</b>	<b>37,8</b>	<b>2 459,6</b>	<b>0,0100</b>	<b>24,7</b>	<b>18,9</b>
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Infogeo.ru	3 467,7	225 398,0	0,0001	19,0	14,6
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Цена-Дайджест	4,2	270,7	0,0211	5,7	4,4
CeO <sub>2</sub>	Цена-Дайджест	4,1	269,1	0,0347	9,3	7,2
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Цена-Дайджест	92,3	5 996,3	0,0034	20,3	15,5
<b>Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Цена-Дайджест</b>	<b>54,1</b>	<b>3 513,3</b>	<b>0,0109</b>	<b>38,4</b>	<b>29,4</b>
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Цена-Дайджест	4,9	320,5	0,0012	0,4	0,3
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Цена-Дайджест	616,9	40 096,9	0,0003	11,6	8,9
ΣTR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	0,0716	85,7	65,7
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Metal-Pages.com	12,9	836,6	0,0014	1,2	0,9

$$K_{\text{перевода}} = \frac{C_{Sc_2O_3} \times I_{Sc_2O_3}}{C_{Nb_2O_5} \times I_{Nb_2O_5}} = \frac{225\,398 \times 0,50}{2460 \times 0,835} = 54,87,$$

где:  $K_{\text{перевода}}$  — коэффициент перевода содержания Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в содержание Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>;  $C_{Nb_2O_5}$  — средняя цена Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (руб./кг) за 2014–2015 гг.;  $C_{Sc_2O_3}$  — средняя цена Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (руб./кг) за 2014–2015 гг.;  $I_{Nb_2O_5}$  — сквозное извлечение Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, доли ед.;  $I_{Sc_2O_3}$  — сквозное извлечение Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, доли ед.

Аналогичным образом в содержание Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> переводятся содержания и других полезных компонентов (табл. 4). Для выбора **бортовых содержаний**, используемых при повариантном подсчете запасов, был проведен статистический анализ рудных интервалов в пределах руды и пермских грубообломочных отложений (природных типов руды, пригодных к рентабельной переработке). Для определения порога нижнего бортового содержания рассчитано содержание Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> в отходах переработки руд (в кеке).

Оксиды, содержание которых в кеке ниже предела обнаружения анализа, учитывались при расчете со значением 1/2 предела обнаружения.

$$Nb_2O_{5\text{ycl.}} (\text{в кеке}) = 0,60 + 54,87 \times 7,67/10000 + 0,10 \times 11,73/10000 + 0,1 \times 0,27/10000 + 1,33 \times 0,12/10000$$

**Таблица 4**  
**Расчет перевода содержаний полезных компонентов в Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>ycl.**

Наименование компонента	Ц <sub>i</sub> , руб./кг	И <sub>i</sub> , доли ед.	Ц <sub>1</sub> , руб./кг	И <sub>1</sub> , доли ед.	К-т перевода
<b>Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	2 460	0,835	2460	0,835	1,00
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	225 398	0,50	2460	0,835	54,87
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	271	0,78	2460	0,835	0,10
CeO <sub>2</sub>	269	0,78	2460	0,835	0,10
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 996	0,78	2460	0,835	2,28
<b>Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3 513	0,78	2460	0,835	1,33
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	320	0,78	2460	0,835	0,12
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40 097	0,78	2460	0,835	15,23
ΣTR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	<b>0,45</b>
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	837	0,78	2460	0,835	0,32

$$+ 2,28 \times 5,85/10000 + 0,12 \times 5,8/10000 + 15,23 \times 5,79/10000 + 0,32 \times 6,35/10000 = \mathbf{0,65}.$$

С учетом принципа полноты извлечения полезного ископаемого из недр, исходя из содержания Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>ycl. в отходах переработки руд (0,65 %), нижний борт принят равным 0,7 % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>ycl.. Шаг бортовых содержаний для повариантного подсчета запасов определялся с условием обеспечения прирезки запасов по руде ~ 20 %. Для этого был выполнен анализ изменения суммарной мощности, метропроцента и количества выработок при различных вариантах бортового содержания. После расчета нескольких вариантов с различным шагом бортового содержания был выбран шаг 0,3 % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>ycl.. Анализ суммарных мощностей рудных интервалов, метропроцента и количества выработок, участвующих в подсчете запасов, подтвердил, что выбранный шаг бортовых содержаний Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>ycl. обеспечивает необходимую разницу в запасах руды. Прирезка по суммарной мощности рудных интервалов составляет более 10 % между вариантами бортового содержания. При уменьшении количества выработок на 5 % выбранный шаг бортовых значений должен обеспечить разницу в объемах руды 15–20 % (рис. 2).

Зависимость суммарного метропроцента (м %) Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>ycl. от вариантов минимальной мощности рудного тела представлена на графике (рис. 3).

**Обоснование минимальной мощности рудного тела, включаемого в контур подсчета запасов.** Для оценки «условных геологических потерь» (рудные тела с мощностью ниже минимальной) при различных вариантах мощности рудного тела были интерпретированы данные статистического анализа распределения рудных интервалов по классам мощностей. В основу анализа положены рудные интервалы для бортового содержания 1 % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>ycl. без ограничения минимальной мощности рудного тела.

Контуры рудных тел, выделенных по бортовому содержанию 1 %  $Nb_2O_{5\text{усл.}}$ , наиболее полно соответствуют литологическим границам преобладающего природного типа руд. Таким образом, анализ «условных геологических потерь», выполненный на основе рудных

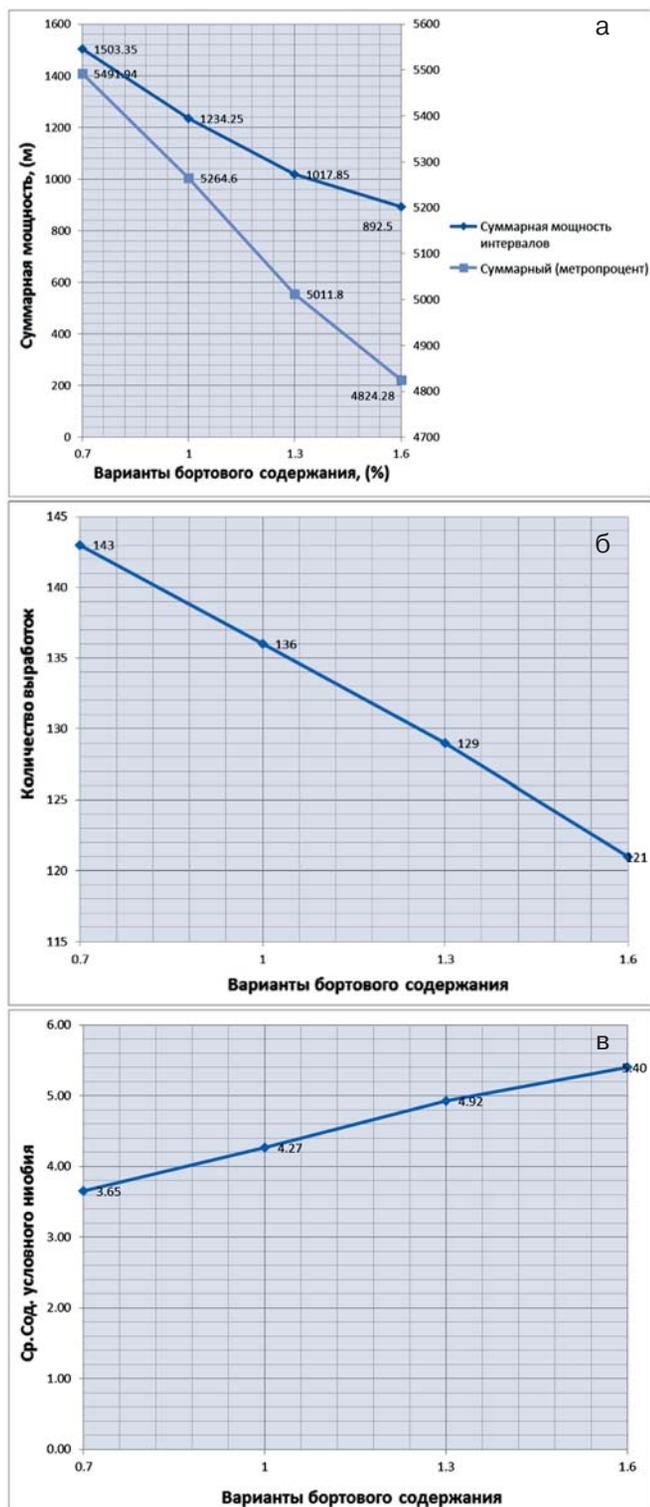


Рис. 2. Суммарная мощность рудных интервалов, суммарный (м %)  $Nb_2O_{5\text{усл.}}$ , и их изменение при вариантах бортового содержания (а); количество выработок, участвующих в подсчете при вариантах бортового содержания (б); средневзвешенное содержание  $Nb_2O_{5\text{усл.}}$  в руде при различных вариантах бортового содержания (в)

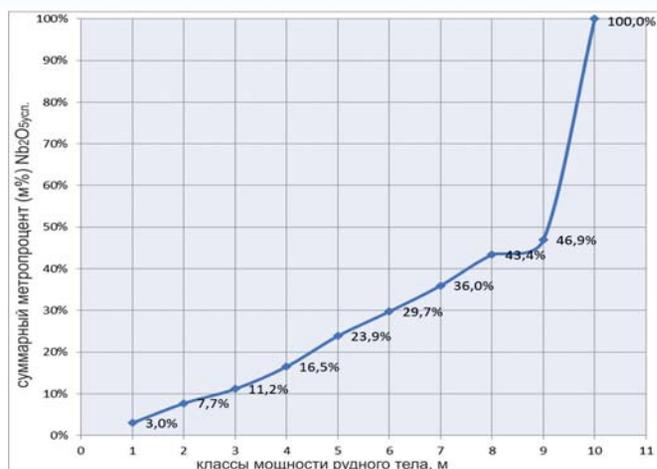


Рис. 3. График накопленного процента  $Nb_2O_{5\text{усл.}}$  в зависимости от вариантов минимальной мощности рудного тела

интервалов, рассчитанных для бортового содержания 1 %  $Nb_2O_{5\text{усл.}}$ , достаточно надежно характеризует закономерности распределения запасов (метропроценты,  $Nb_2O_{5\text{усл.}}$ ) по классам мощностей рудного тела [6, 7, 11].

На гистограмме представлены результаты анализа распределения метропроцента  $Nb_2O_{5\text{усл.}}$  по классам мощности рудных тел: наименьшую долю в запасах (3,0 %) играют рудные тела в классе мощности 1–2 м, все классы выше 4 м (кроме 9–10 м) имеют долю в запасах более 5 %. Результаты проведенного анализа позволяют сделать следующие выводы: исходя из принципа наиболее полного извлечения полезного ископаемого из недр, оптимальным представляются варианты минимальной мощности рудного тела 2 и 3 м, так как при варианте 4 м в недрах остается более 10 % разведанных запасов. Исходя из соображений сохранения сплошности рудного тела, оптимален компромиссный вариант минимальной мощности 4 м (при «условных геологических потерях» в 11,2 %).

**Обоснование максимальной мощности некондиционного прослоя, включаемого в контур подсчета запасов.** Пустые прослоя, включаемые в контур подсчета запасов, выступают как разубоживающая масса. Для каждой скважины определялась суммарная длина проб по прослоям пустых пород по классам 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10 м. Отношение суммарной длины проб в каждом классе к общей длине рудных проб рассматривается как «условное геологическое разубоживание». В качестве оптимальной рассматривается такая максимальная длина безрудных проб, включаемых в подсчет запасов, при которой обеспечивается «условное геологическое разубоживание» (10 %).

Зависимость «условного геологического разубоживания» от принятых вариантов максимальной мощности прослоя некондиционных руд интенсивно возрастает до значения пустого прослоя 3 м, а также в интервале мощности пустого прослоя от 4 до 5 м. Для подсчета запасов приняты следующие параметры кондиций:

— оконтуривание рудных тел по мощности производится по бортовым содержаниям  $Nb_2O_{5\text{усл.}}$  0,7–1,0 % — 1,3–1,6 %;

**Таблица 5**  
**Содержание полезных компонентов в отходах переработки руд**

Содержание оксидов в кеке								
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , (%)	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , (г/т)	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , (г/т)	CeO <sub>2</sub> , (г/т)	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , (г/т)	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub> , (г/т)	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , (г/т)	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , (г/т)	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , (г/т)
0,60	—	0,16	0,27	0,12	*	*	*	*

\* ниже предела обнаружения.

**Таблица 6**  
**Изменение подсчетных параметров при вариантах бортового содержания**

Бортовое содержание Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> сусл., %	Кол-во выработок с рудными интервалами	Прирезка (по кол-ву выработок), %	Суммарная мощность интервалов	Прирезка (по суммарной мощности), %	Суммарный (м%)	Прирезка (по суммарному м%)	Средне-взвешенное содержание Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> сусл.
0,7	143		1503,35		5491,94		3,65
1,0	136	4,9	1234,25	17,9	5264,6	4,1	4,27
1,3	129	5,1	1017,85	17,5	5011,8	4,8	4,92
1,60	121	6,2	892,5	12,3	4824,28	3,7	5,40

— минимальная вертикальная мощность рудного тела, включаемого в контур подсчета запасов — 4 м;  
 — максимальная мощность некондиционного про- слоя, включаемого в контур подсчета запасов — 4 м;  
 — запасы руды, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CeO<sub>2</sub>, Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Pr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) + Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> считать в пределах рудных тел, оконтуренных по бортовым содержаниям Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>сусл.;

— к балансовым отнести запасы руд и полезных компонентов, геометризованные в пределах пироклор-монацит-крандаллитовых руд, и пермских грубообломочных отложений, в экономически обоснованных контурах карьеров.

**Обоснование способа подсчета запасов.** Учитывая относительно простую морфологию рудных залежей (месторождение 2-й группы по сложности геологического строения), значительную площадь рудоносной толщи, субгоризонтальное залегание, для подсчета запасов выбран метод геологических блоков, обеспечивающий участие наибольшего количества выработок в расчете среднеблочных содержаний полезных компонентов для кат. С<sub>2</sub> (апробированным на практике оценки запасов ГГИС Micromine).

**Выявление ураганных содержаний полезных компонентов.** При подсчете запасов содержания «ураганных проб» требуют замены значениями нормальной для месторождения пробы. Пороговые содержания полезных компонентов определялись отдельно для участков Северный и Южный для всех вариантов бортового содержания. В первую очередь рассчитывались значения функции персентиль для различных значений накопленного процента (от общей выборки), затем строился график динамики изменения порогов приемлемости содержаний (кумулята), на котором фиксировалась критическая точка перегиба.

**Объемная масса и влажность руд.** Для проведения лабораторных испытаний использовались 199 образцов из разных литологических разностей месторождения (в том числе 41 образец из 20 скважин в пределах ПМК

и 75 образцов из пермских отложений).

Для определения средних значений объемной массы и основных статистических показателей была обработана выборка из 113 определений объемной массы в сухом и влажном состоянии в образцах из двух природных типов руд. Для подсчета запасов принята объемная масса

руды в «сухом состоянии». Коэффициенты вариации значений объемной массы незначительны: 8,0–10,6 % для руд и 6,1–14,4 % для пермских отложений, что свидетельствует о выдержанности этого параметра. Расхождения в значениях объемной массы ПМК и пермских руд в «сухом состоянии» также незначительны.

Для подсчета запасов сухой руды принято среднее значение объемной массы 1,87 г/см<sup>3</sup>. Объемная масса ПМК и пермских отложений во «влажном» состоянии имеет значительные отличия (0,39–0,74 г/см<sup>3</sup>) в различных вариантах расчета. Существенные отличия в значениях объемной массы руд в естественном состоянии обусловлены литологическим составом пермских отложений, представленных гравелитами. Среднее значение влажности: ПМК — 20,47 %; пермские отложения — 14,76 %.

**Условия оконтуривания рудных тел.** Оконтуривание рудных тел по мощности проводилось по данным опробования скважин по четырем вариантам бортового содержания Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>сусл. (%): 0,7; 1,0; 1,3; 1,6. Руды латеритной коры выветривания (сидеритовый, франколитовый, гётитовый горизонты) не могут быть рентабельно переработаны, а ПМК и оруденелые пермские отложения перерабатываются по единой технологии [10, 12]. Таким образом, выделение рудных интервалов для повариантного подсчета запасов производилось в пределах объединенной толщи пермских грубообломочных отложений и ПМК (балансовые руды). Верхняя граница рудного пласта фиксировалась бортовым содержанием, либо контрастной литологической границей с пермскими углями или юрскими отложениями; нижняя граница — бортовым содержанием, либо литологической границей, диагностируемой по увеличению содержания сидерита с латеритными рудами.

**Блокировка и квалификация запасов.** Рудные тела, оконтуренные по бортовым содержаниям Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>сусл., разделялись на подсчетные блоки с соблюдением принципа однородности — подсчетный блок характеризуется одинаковой плотностью разведочной сети и

**Таблица 7**  
**Результаты анализа межбортовых прирезок по тоннажу руды**

Бортовое содержание Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> усл.	Категория запасов	Запасы «сухой» руды, т (уч. Северный и Южный)	Запасы «сухой» руды («прирезаемая часть»), т	Запасы «сухой» руды («прирезаемая часть»), % отн.
0,7	C <sub>1</sub> +C <sub>2</sub>	60240112,1	—	—
1,0	C <sub>1</sub> +C <sub>2</sub>	48810353,9	11429758,1	18,97
1,3	C <sub>1</sub> +C <sub>2</sub>	39680184,4	9130169,5	18,71
1,6	C <sub>1</sub> +C <sub>2</sub>	30874599,4	8805585,0	22,19
Среднее:				19,96

**Таблица 8**  
**Основные финансово-экономические технико-экономические показатели проекта по вариантам бортового содержания Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> усл.**

№ п/п	Наименование показателей	Ед. изм.	Бортовое содержание Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> усл., %			
			0,7	1,0	1,3	1,6
1	Норма дисконтирования	%	15	15	15	15
2	Дисконтированная сумма инвестиций	млн руб.	12 319,5	11 112,3	10 050,8	9 288,6
3	Чистый дисконтированный доход	млн руб.	7 370,9	4 721,4	2 786,4	219,3
4	Индекс доходности	доли ед.	1,6	1,42	1,28	1,02
5	Внутренняя норма доходности	%	27,2	24,6	21,9	15,7
6	Дисконтированный период окупаемости	лет	7,3	8,3	9,2	17,1
7	Бюджетная эффективность	млн руб.	40 175,5	32 417,2	26 597,9	5 695,8
8	Дисконтированная эффективность	млн руб.	10 925,1	8 920,5	7 396,1	20 502,6

степенью изученности, выдержанностью геологических и морфологических параметров, общностью горнотехнических условий отработки. Согласно «Методическим рекомендациям по применению Классификации запасов к месторождениям Nb, Ta и TR руд», месторождение относится ко второй группе сложности по геологическому строению, запасы классифицируются по кат. C<sub>1</sub> (сеть 200×200 м), а оцененные по сети, разреженной в 2–4 раза, по кат. C<sub>2</sub>. В соответствии с принятыми кондициями к балансовым отнесены запасы руд и полезных компонентов, геометризованные в пределах ПМК и пермских грубообломочных отложений в контурах проектных карьеров. Запасы за проектными контурами карьеров отнесены к забалансовым.

#### Методика определения объемов блоков и запасов полезных компонентов

Объемы блоков определялись в ГГИС Micromine, затем производился расчет запасов руды для каждого подсчетного блока по формуле:

$$Q = V \times D$$

где  $Q$  — запасы руды, т,  $D$  — объемная масса, т/м<sup>3</sup>.

Подсчитаны запасы полезных компонентов для каждого блока:

$P = Q \times C$ , где  $P$  — запасы полезного компонента, т;  $Q$  — запасы руды, т;  $C$  — содержание полезного компонента, г/т.

В каждом подсчетном блоке статистически определялось отношение природных типов руд: ПМК и рудных пермских грубообломочных отложений.

$$W_{\text{ПМК}} = \left( \frac{L_{\text{ПМК}}}{L_{\text{общ}}} \right) \times 100, \%$$

$$W_{\text{п}} = \left( \frac{L_{\text{п}}}{L_{\text{общ}}} \right) \times 100, \%$$

где  $W_{\text{ПМК}}$  — доля запасов пироксид-монацит-крандалитовых руд в процентном выражении, %;  $W_{\text{п}}$  — доля запасов рудных пермских грубообломочных отложений в процентном выражении, %;  $L_{\text{п}}$  — длина рудных интервалов в пределах пермских отложений, м;  $L_{\text{ПМК}}$  — длина рудных интервалов в пределах ПМК горизонта, м;  $L_{\text{общ}}$  — общая длина рудных интервалов, м.

**Результаты повариантного подсчета.** По результатам подсчета запасов участков Северный и Южный после подавления выдающихся содержаний достигнута достаточная разница между вариантами по тоннажу руды (более 10 % отн.). Это подтверждает выводы, сделанные

при выборе бортового содержания с помощью анализа «линейных запасов». Результаты анализа межбортовых прирезок по руде (обобщенные для двух участков) приведены в табл. 7.

На рис. 4 приведены результаты анализа изменения содержания Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> усл. при различных вариантах подсчета — а) для Северного участка и б) для Южного участка. Средние содержания Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> во всех подсчетных блоках закономерно возрастают с увеличением бортового содержания, что свидетельствует о достоверности выполненного подсчета запасов. На рис. 5 отражена динамика изменения запасов полезных компонентов при различных вариантах бортового содержания для обоих участков.

Запасы полезных компонентов закономерно снижаются с увеличением бортового содержания; закономерно снижаются на величину до 6,6 % на участке Северный и на 1,01–6,14 % — на Южном. Подсчитанные по четырем вариантам содержания Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> усл. запасы руд и металлов положены в основу ТЭО временных разведочных кондиций участков Северный и Южный месторождения комплексных редкоземельных руд Томтор.

#### Основные результаты технико-экономической оценки

В основу технико-экономических расчетов для обоснования временных разведочных кондиций участков Северный и Южный Томторского рудного поля положены запасы руды и полезных компонентов, подсчитанные в пределах карьера первоочередной отработки, соответствующего горизонту расчета 20 лет (в т.ч. добычи и переработки руды — 18 лет). Результаты ТЭР

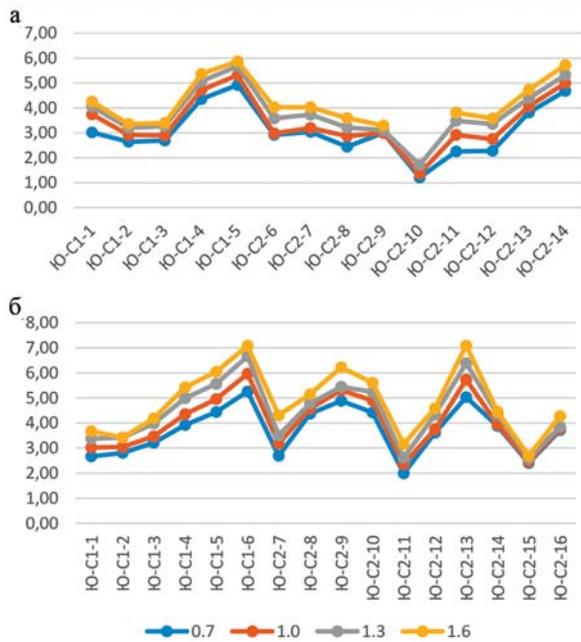


Рис. 4. Изменение средних содержаний  $Nb_2O_{5\text{ycl}}$  в подсчетных блоках при вариантах бортового содержания: а) участок Северный, б) участок Южный

свидетельствуют об экономической эффективности отработки запасов Томторского рудного поля при всех вариантах с бортовым содержанием  $Nb_2O_{5\text{ycl}}$  (0,7–1,6 %). При этом бортовое содержание  $Nb_2O_{5\text{ycl}}$  0,7 % близко к расчетному содержанию в отходах переработки и фактически соответствует варианту отработки «на массу», кроме того объем первоначальных инвестиций при варианте бортового содержания 1,0 %  $Nb_2O_{5\text{ycl}}$  ниже на 16,6 %.

Показатели экономической эффективности инвестиций (внутренняя норма доходности, дисконтированный период окупаемости и сумма инвестиций) для бортовых содержаний условного ниобия 1,0 и 1,3 % отличаются в пределах 10 %, но при этом эксплуатационные запасы руды снижаются на 10 %. Техничко-экономические параметры по бортовому содержанию  $Nb_2O_{5\text{ycl}}$  1,6 % находятся на грани рентабельности (индекс доходности — 1,02, дисконтированный период окупаемости — 17,7 лет, внутренняя норма доходности — 15,7 %), а также на 13,4 % снижаются эксплуатационные запасы руды.

По совокупности геологических, технологических, горнотехнических, экономических факторов и принципа полноты извлечения полезного ископаемого из недр в качестве оптималь-

ного предлагается вариант бортового содержания 1,0 %  $Nb_2O_{5\text{ycl}}$ .

Анализ чувствительности технико-экономических показателей показывает, что все варианты отработки запасов являются устойчивыми к изменению ключевых параметров, с учетом которых возможно добывать и перерабатывать руду. Наибольшее влияние на NPV оказывают: а) изменение цены реализации товарного продукта; б) изменение эксплуатационных расходов, а наименьшее влияние — изменение капитальных затрат. Таким образом, основные риски связываются со снижением рыночных цен на товарную продукцию (приводит к снижению NPV), а также возможный рост операционных затрат, связанный с колебаниями курса долл. США и промышленной инфляцией.

Более гибкое управление рисками, сопровождающими проект, позволяет регулировать «стандартную» общепринятую ставку дисконтирования, например, с 15 до 12 % или до 10 %, исходя из достоверности и точности оценок размеров капитальных вложений, операционных затрат и доходов от реализации в течение всего срока работы, более того, в условиях стабильности текущих и прогнозных макроэкономических показателей (инфляция и пр.). В таком случае

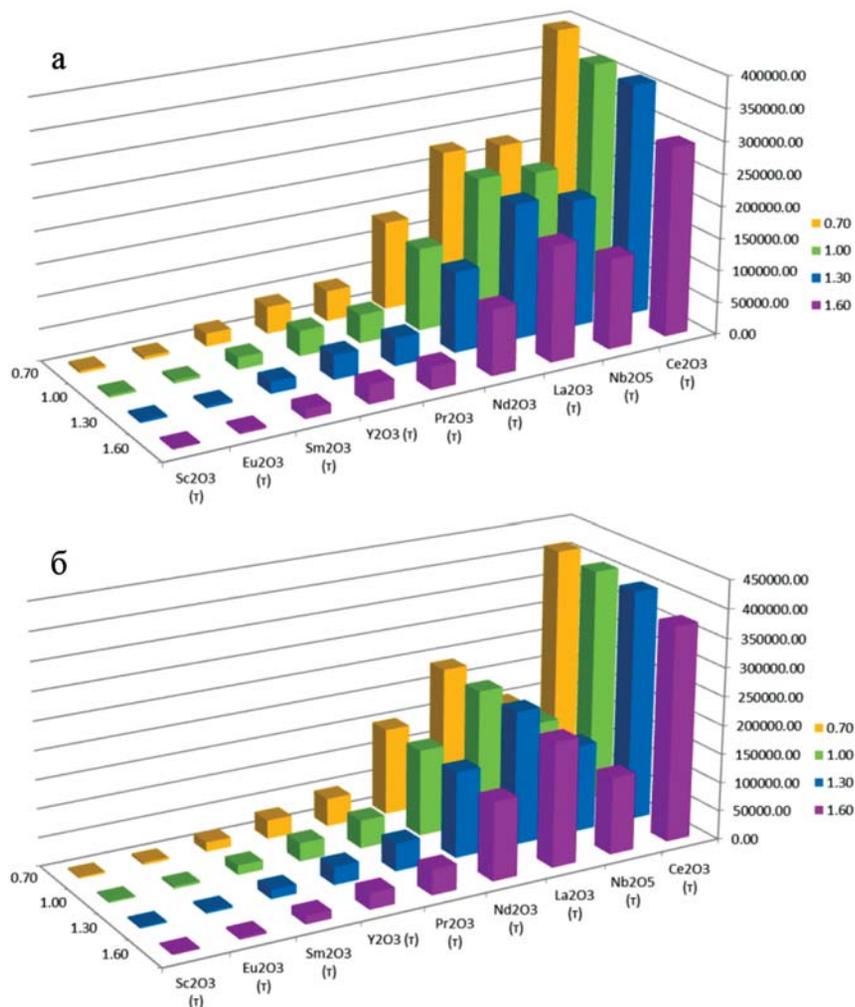


Рис. 5. Динамика изменения запасов полезных компонентов при различных вариантах бортового содержания: а) участок Северный, б) участок Южный

экономические параметры — по сути, важнейший решающий фактор для принятия управленческих решений о разработке проекта (рентабельность проекта, приведенный дисконтированный доход) резко возрастают, а сроки окупаемости снижаются.

#### Заключение

Для комплексных уникально богатых ниобий-редкоземельных пироксид-монацит-крандаллитовых руд, оцененных в пределах Северного и Южного участков Томторского рудного поля, несмотря на невысокую относительную долю в суммарной товарной продукции (менее 20 %), предложен методический подход к подсчету запасов по условному ниобию. Основная причина приведения всего спектра полезных компонентов ( $TR_2O_3$ ) к условному ниобию — стабильная цена на ниобиевую продукцию (феррониобий) при наличии устойчивого спроса на мировом рынке в течение длительного периода. Редкоземельные элементы, имеющие максимальный вес в стоимости товарной продукции (65,7 %), напротив, имеют высокую волатильность цен на индивидуальные оксиды и нестабильность спроса на мировом рынке при продолжающейся неопределенности спроса на редкоземельную продукцию на внутреннем российском рынке. Разработанное для руд Северного и Южного участков технико-экономическое обоснование кондиций позволило выполнить подсчет запасов уникальных руд по условному компоненту по кат.  $C_1$  и  $C_2$ , подтвердивший реальную возможность отработки уникальных руд в современных условиях, подсчитанных по бортовому содержанию условного ниобия от 0,7 до 1,6 % и эффективному сроку окупаемости вложений от 7 до 9 лет. Гибкое управленческие рисками, т.е. снижение стандартной ставки дисконтирования, например, с 15 до 12 % или до 10 % возможно, исходя из достоверности и точности введения экономических параметров проекта, а также в условиях стабильности текущих и прогнозных макроэкономических показателей. Это позволяет резко повысить рентабельность и приведенный дисконтированный доход проекта, снизить сроки окупаемости.

*Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ 18-17-00120 «Геологические, минералогические, геохимические и физико-химические условия формирования уникального комплексного редкоземельного и редкометалльного оруденения томторского типа».*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Быховский, Л.З. Задачи дальнейшего изучения Томторского рудного поля с целью повышения его инвестиционной привлекательности / Л.З. Быховский, Е.И. Котельников, Е.Г. Лихникевич, В.С. Пикалова // Разведка и охрана недр. — 2014. — № 9. — С. 20–25.
2. Быховский, Л.З. Редкометалльное сырье России: перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы / Л.З. Быховский, Н.А. Архипова // Разведка и охрана недр. — 2016. — № 11. — С. 26–30.
3. Кравченко, С.М. Скандиево-редкоземельно-иттриево-ниобиевые руды — новый тип редкометалльного сырья / С.М. Кравченко, А.Ю. Беляков, А.И. Кубышев, А.В. Толстов // Геология рудных месторождений. — 1990. — Т. 32. — № 1. — С. 105–109.
4. Лазарева, Е.В. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) / Е.В. Лазарева, С.М. Жмодик, Н.Л. Добрецов, А.В. Толстов, Б.Л. Щербов, Н.С. Карманов, Е.Ю. Герасимов, А.В. Брянская // Геология и геофизика. — 2015. — Т. 56. — № 6. — С. 1080–1115.

5. Лапин, А.В. Минерагеня кор выветривания карбонатитов / А.В. Лапин, А.В. Толстов. — М.: ГЕОКАРТ. ГЕОС, 2011. — 308 с.
6. Похиленко, Н.П. Томтор как приоритетный инвестиционный проект обеспечения России собственным источником редкоземельных элементов / Н.П. Похиленко, В.А. Крюков, А.В. Толстов, Н.Ю. Самсонов // ЭКО. — 2014. — № 2 (476). — С. 22–35.
7. Рылов, Д.А. Перспективы и способы отработки Томторского рудного поля / Д.А. Рылов, А.П. Слепцов, А.В. Толстов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2016. — № 3. — С. 168–175.
8. Толстов, А.В. Промышленные типы месторождений в карбонатитовых комплексах Якутии / А.В. Толстов, А.Р. Энтин, А.А. Тянь, А.Н. Орлов. — Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1995. — 168 с.
9. Толстов, А.В. Главные рудные формации Севера Сибирской платформы. МПР РФ. Федеральное агентство по недропользованию. РАН / А.В. Толстов. — М.: ИМГРЭ, 2006. — 212 с.
10. Толстов, А.В. Особенности формирования уникального редкометалльного месторождения Томтор и оценка перспектив его освоения / А.В. Толстов, А.Д. Коноплев, В.И. Кузьмин // Разведка и охрана недр. — 2011. — № 6. — С. 20–25.
11. Толстов, А.В. Инвестиционная привлекательность Томторского месторождения и перспективы ее повышения / А.В. Толстов, Н.П. Похиленко, А.В. Лапин, В.А. Крюков, Н.Ю. Самсонов // Разведка и охрана недр. — 2014. — № 9. — С. 25–30.
12. Энтин, А.Р. О последовательности геологических событий, связанных с внедрением Томторского массива ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (Северо-Западная Якутия) / А.Р. Энтин, А.И. Зайцев, Н.И. Ненашев, В.Б. Василенко, А.И. Орлов, О.А. Тянь, Ю.А. Ольховик, С.И. Ольштынский, А.В. Толстов // Геология и геофизика. — 1990. — Т. 31. — № 12. — С. 42–51.

© Коллектив авторов, 2019

Слепцов Афанасий Петрович // sleptsoffap@gmail.com  
Толстов Александр Васильевич // tolstovav@alrosa.ru  
Мамашев Александр Вячеславович // a.tomashev@mail.ru  
Самсонов Николай Юрьевич // samsonovNYu@alrosa.ru  
Баранов Леонид Николаевич // geoleo@igm.nsc.ru

УДК 546.631:553.068.3+622.775

**Руденко А.А.<sup>1</sup>, Трошкина И.Д.<sup>2</sup>, Данилов А.А.<sup>3</sup>**  
**(1 — ФГБУ «ВИМС», 2 — РХТУ им. Д.И. Менделеева,**  
**3 — ООО «Золотой Запас»)**

#### ОПЫТ ПОЛУЧЕНИЯ СКАНДИЕВОГО КОНЦЕНТРАТА ИЗ МАТЕРИАЛА КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ

*Приведены результаты изучения скандийсодержащих латеритных кор выветривания в Кооперативной Республике Гайана и возможности получения товарной продукции — черного скандиевого концентрата. Разработаны основные направления оптимизации условий сорбции/экстракции, концентрирования первичного элюата, осаждения и очистки первичного концентрата скандия.*  
**Ключевые слова:** выщелачивание, концентрат, кора выветривания, латериты, минералы, редкие металлы, ресурсы, скандий, сорбция, экстракция, элюат.

Rudenko A.A.<sup>1</sup>, Troshkina I.D.<sup>2</sup>, Danilov A.A.<sup>3</sup> (1 — VIMS, 2 — RHTU of D.I. Mendeleev, 3 — Gold Reserves)

#### EXPERIENCE OF RECEIVING THE SCANDIUM CONCENTRATE FROM AERATION BARK MATERIAL

*The results of the study of scandium-containing laterite weathering crusts in the Cooperative Republic of Guyana and the possibility of obtaining commercial products — draft scandium concentrate. The main directions of optimization of conditions*