

# РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ РОССЫПЕЙ И КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

А. В. Лаломов, А. А. Бочнева

ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, минералогии, петрографии и геохимии РАН  
(Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 6 июня 2018 г.

*Редкометалльные месторождения россыпей, кор выветривания и техногенных объектов обладают существенным сырьевым потенциалом, обусловленным значительными объемами природных и техногенных редкометалльных объектов, их высокой рентабельностью, быстрой окупаемостью вложений и технологической доступностью обогащения. В пределах Арктической зоны России выделяются природные комплексы лопаритовых россыпей Ловозерского массива, техногенные отвалы обогащения апатитовых руд Хибинской группы месторождений и бабделитовые техногенные руды Ковдорского месторождения (Кольский полуостров), ультрабогатые гипергенно измененные осадочные руды Томтора и техногенные золото-монацитовые россыпи Кулара (Якутия), редкометалльно-титановые россыпи Салехарда и Тимана, а также оловянные руды Чукотки и Якутии, содержание в которых тантала, ниобия, скандия и индия могут достигать промышленной значимости. За счет россыпных и техногенных месторождений может быть оперативно решена задача обеспечения страны редкометалльным сырьем.*

**Ключевые слова:** редкие металлы, россыпи, техногенные объекты, Арктическая зона России.

## Введение

Согласно «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года», утвержденной президентом Владимиром Путиным 20 февраля 2013 г., основные характеристики социально-экономического развития Арктической зоны России и обеспечения национальной безопасности включают в себя «прирост балансовых запасов полезных ископаемых за счет проведения геолого-разведочных работ в Арктической зоне Российской Федерации».

В соответствии с распоряжением Правительства РФ № 50-р от 16 января 1996 г. в перечень основных видов стратегического минерального сырья входит группа редких металлов (РМ), к которым относятся ниобий, тантал, цирконий, гафний, скандий, индий, рений, а также редкоземельные металлы (РЗМ) и ряд других элементов. В балансе запасов этих видов сырья россыпи составляют существенную, а в некоторых случаях и преобладающую часть.

Указанные РМ присутствуют в виде основных или попутных компонентов россыпей, а также в виде примеси в главных минералах россыпей — касситерите, ильмените, лейкоксене и цирконе.

РМ применяются в различных областях современных высокотехнологичных производств от металлургии и атомной энергетики до радиоэлектроники и медицины, их потребление характеризует технологический уровень развития промышленности.

Генетический спектр РМ-россыпей весьма широк: это переотложенные коры выветривания, гляциальные, склоновые, аллювиальные, озерные и прибрежно-морские россыпи. Значительная часть РМ-ресурсов сосредоточена в техногенных образованиях, являющихся продуктами переработки как россыпных, так и коренных месторождений.

Доля россыпей в балансе добычи превышает (иногда в два-три раза) долю в балансе запасов. Это относится как к россыпям в целом, так и к редкометалльным россыпям в частности (табл. 1) и объясняется относительной технологической простотой извлечения полезных компонентов из россыпных руд, повышенной рентабельностью месторождений

Таблица 1. Соотношение россыпей в балансах запасов полезных ископаемых и добычи России и мира

Вид сырья / регион	Доля в запасах (B + C <sub>1</sub> + C <sub>2</sub> , measured and indicated), %	Доля в общей добыче, %	Источник данных
Золото / Россия	13	26	[1]
Золото / мир	5,6 *	12 *	[2]
Платиноиды / Россия	0,3	4,5	[3]
Олово / Россия	12,4	25	По состоянию на 1989 г. [4]
Олово / мир	?	33	[1]
Алмазы / Россия	6,1	16,4	[1]
Титан / мир	33	70	[5]
Цирконий / мир	80	95	[5]
Вольфрам / Россия	Менее 1	3,3/25 **	[1]
Ниобий / мир	20 *	70 *	[6]
Тантал / мир	4 *	Более 10 *	[7]

\* Включая коры выветривания.

\*\* Включая техногенные месторождения.

и быстрой окупаемостью вложений, что делает россыпи первоочередными объектами при освоении новых или реанимации старых рудно-россыпных площадей.

В настоящее время основные перспективы развития минерально-сырьевой базы направлены, как правило, на коренные объекты, тем не менее россыпные месторождения обладают значимым потенциалом и по ряду позиций могут в короткие сроки (что особенно важно в сложившейся международной обстановке) в значительной мере обеспечивать потребности России.

### Сырьевая база редких металлов России и мира

По балансовым запасам и ресурсам многих видов РМ Россия занимает ведущие позиции в мире, но по добыче и производству товарных концентратов доля нашей страны не превышает первых процентов или долей процента.

Мировые запасы ниобия оцениваются на уровне 16 млн т, крупнейшими запасами обладает Бразилия (70%), более 50% ниобия добывается из колумбит-пироксеновых руд месторождений кор выветривания и россыпей. Доля запасов ниобия России оценивается в 22%<sup>1</sup>. По оценке «Инфомайн», запасы пентоксида ниобия в России составляют около

3,5 млн т (2,45 млн т в пересчете на ниобий)<sup>2</sup>. Кроме того, на государственном балансе числятся запасы ниобия месторождений Белозиминского, Больше-тагнинского, Томтора, Чуктуконского, связанные в основном с карбонатитами и их корами выветривания [8]. В пределах Лавозерского массива выявлены россыпи лопарита [6]. В России в последние годы ниобиевое сырье добывалось на двух месторождениях: Ловозерском в Мурманской области (лопаритовые концентраты) и Татарском в Красноярском крае в 2001—2013 гг. (пироксеновые концентраты). Доля России в мировом производстве пентоксида ниобия не превышает 6%.

Мировые запасы тантала на 2013 г. оценивались в 317 тыс. т. На долю России приходится около 10% (31 тыс. т), которые сосредоточены в месторождениях Катугинском, Зашихинском (щелочные граниты), Ловозерском (лопаритовые уртиты) и Вишняковском (пегматиты); содержание Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> варьирует от 0,02% до 0,2% [9]. В Африке и Австралии значительная часть тантала (до 20%) добывается из аллювиальных россыпей и кор выветривания пегматитов.

Российские запасы циркония оцениваются в 12 млн т; по этому показателю наша страна находится на четвертом месте в мире. Добыча в 2015 г. производилась только на Ковдорском месторождении в виде бадделейтового концентрата и составила

<sup>1</sup> <http://rareearth.ru/ru/pub/20160803/02352.html>.

<sup>2</sup> <https://megaobuchalka.ru/3/29775.html>.

0,5% мировой. За рубежом разрабатываются только россыпные месторождения циркония. В отличие от основных стран — продуцентов циркониевых концентратов в российской минерально-сырьевой базе преобладают коренные магматогенные месторождения, в которых находится почти 70% запасов диоксида циркония, а в россыпных объектах — всего 30%. Половина российских запасов диоксида циркония заключена в двух крупных коренных месторождениях, приуроченных к массивам редкометалльных гранитов, — циркон-пироксид-криолитовом Катугинском (3,1 млн т) в Забайкальском крае и циркон-пироксид-колумбитовом Улуг-Танзекском (2,9 млн т) в Республике Тыва. Комплексные труднообогатимые руды с танталом, ниобием, редкоземельными элементами и ураном содержат 1,6%  $ZrO_2$  в подготавливаемом к освоению Катугинском и 0,4%  $ZrO_2$  в не переданном в освоение Улуг-Танзекском месторождениях. Нигде в мире месторождения подобного типа не разрабатываются [1].

Запасы РЗМ, учитываемые Государственным балансом запасов полезных ископаемых Российской Федерации, достигают 26,9 млн т  $\Sigma TR_2O_3$ , и по этому показателю страна уступает только Китаю (55 млн т), добывающему 86,7% РЗМ. Производство концентратов РЗМ в России оценивается в 2,3 тыс. т, что составляет 2,1% мировой добычи. Более 40% российских запасов категорий А + В +  $C_1$  +  $C_2$  РЗМ как цериевой, так и иттриевой групп (около 11 млн т) учитывается в девяти апатит-нефелиновых месторождениях, расположенных в пределах концентрически-зонального Хибинского массива нефелиновых сиенитов. Основным компонентом их руд является фосфор, а РЗМ играют роль попутных компонентов при низких их концентрациях, которые колеблются от 0,2% до 1,1%  $\Sigma TR_2O_3$ . При таком содержании извлечение, как правило, нерентабельно даже при условии разработки этих месторождений на другие виды сырья. Извлекаемые из недр РЗМ концентрируются в апатитовом концентрате и отходах его производства (фосфогипсе) и складированы [1].

Еще около 16% запасов РЗМ, преимущественно цериевой группы, сосредоточено в лопаритовых рудах титан-ниобий-тантал-редкоземельного Ловозерского месторождения. Это единственный объект в России, где ведется извлечение РЗМ в концентраты для их дальнейшей переработки в индивидуальные оксиды и соединения РЗМ. Запасы лопарита на месторождении (участки Карнасурт, Кедыквырпах и Аллуайв) составляют 2,65 млн т. Содержание в отработываемых рудах  $Nb_2O_5$  составляет 0,36%,  $Ta_2O_5$  — 0,026%,  $\Sigma TR_2O_3$  — 1,34% [10].

В Республике Саха (Якутия) сосредоточено 4,5 млн т запасов РЗМ категорий А + В +  $C_1$  +  $C_2$ , или 16,8% российских. Здесь располагаются Томторское и Селигдарское месторождения, а также техногенная золото-редкоземельная Куларская россыпь. Балансовые запасы Томторского месторождения связаны с наиболее богатыми рудами Буранного

участка, образованными за счет переотложения кор выветривания карбонатитов и их интенсивного выщелачивания в зоне гипергенеза.

Имеющиеся в России крупные объекты с уникально богатыми рудами РМ часто размещены в отдаленных районах со слабо развитой инфраструктурой, а руды их труднообогатимы [1], поэтому задача выявления рентабельных месторождений с обогащенными рудами в уже освоенных горнорудных районах является насущной. Она может быть оперативно решена за счет россыпных и техногенных месторождений, которые способны в короткие сроки обеспечить ближайшие потребности страны в редкометалльном сырье.

### **Редкометалльные месторождения россыпей, кор выветривания и техногенных образований Арктической зоны**

Среди большого количества промышленных редкометалльных минералов россыпеобразующими свойствами обладают около 30, главные из которых циркон, монацит, колумбит, танталит, пироксид, лопарит, ксенотим, танталоносный касситерит, бадделит, бастнезит. Повышенные концентрации РЗМ встречаются в лейкоксене. Характеристики основных минералов, образующих концентрации РМ в россыпях и корах выветривания, приведены в табл. 2.

#### *Редкометалльные россыпи лопарита Кольского полуострова*

Важным источником РЗМ может служить группа редких по генезису и минеральному составу лопаритовых россыпей, связанных с Ловозерским массивом нефелиновых сиенитов. Лопарит — высококомлексное редкометалльное сырье. В лопарите ловозерских россыпей содержится 8,3%  $Nb_2O_5$ , 0,67%  $Ta_2O_5$ , 39,8%  $TiO_2$ , 34,88%  $\Sigma TR_2O_3$ , что весьма близко к составу лопарита коренных руд.

Лопаритовые россыпи на Кольском полуострове расположены по северной периферии Ловозерского плутона (Шамякская, Сергеванская и Ревдинская), на его южном склоне (Райявская) и у восточного подножья (участки Губы Мотка и Прибрежный), а также в центральной котловине, занятой озером Сейдозеро (рис. 1). Их местоположение контролируется участками максимального вскрытия лопаритовых пород дифференцированного комплекса и элементами рельефа, благоприятными для накопления лопарита: локальными депрессиями коренного ложа по северному обрамлению массива, обработанной ледником и впоследствии занятой подпрудным озером центральной Сейдозерской котловиной, береговой зоной озера Ловозеро [6].

Основные пласты лопаритовых россыпей Ловозерской группы связаны с ледниковыми образованиями позднего плейстоцена, продуктивный пласт приурочен исключительно к ледниковым (морен-

Таблица 2. Характеристика главных минералов россыпных месторождений

Минерал	Химическая формула	Полезный компонент	Содержание полезного компонента, %	Примеси
Пирохлор	$(\text{Na}, \text{Ca})\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH}, \text{F})$	$\text{Nb}_2\text{O}_5$ $\text{Ta}_2\text{O}_5$	59—76 До 7	U, Th, TR
Колумбит	$(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Nb}_2\text{O}_6$	$\text{Nb}_2\text{O}_5$ $\text{Ta}_2\text{O}_5$	59—7 1—20	—
Танталит	$(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Ta}_2\text{O}_6$	$\text{Ta}_2\text{O}_5$ $\text{Nb}_2\text{O}_5$	63—86 0,2—20	—
Лопарит	$(\text{Na}, \text{Ce}, \text{Ca})_2(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$	$\text{Ta}_2\text{O}_5$ $\text{Nb}_2\text{O}_5$ $\Sigma\text{TR}_2\text{O}_3$	8,0—12,8 0,6—0,8 30,0—33,5	Ti, TR, Sr
Монацит	$(\text{Ce}, \text{La})\text{PO}_4$	$\Sigma\text{TR}_2\text{O}_3$	45—54	Th, U, Y, Sc
Циркон	$\text{ZrSiO}_4$	$\text{ZrO}_2$	60—67	Hf, Th, Sc, Y, TR
Бадделейт	$\text{ZrO}_2$	$\text{ZrO}_2$	95—99	Hf
Ксенотим	$\text{YPO}_4$	$\text{Y}_2\text{O}_3$	До 61	U, Tb, TR
Бастнезит	$(\text{Ce}, \text{La})\text{CO}_3(\text{F}, \text{OH})$	$\Sigma\text{TR}_2\text{O}_3$	До 75	Th, Sc, Y



Рис. 1. Редкометалльные лопаритовые россыпи Ловозерского массива: 1 – Ревдинская группа россыпей, 2 – Сейдозерская группа россыпей, 3 – Райявская россыпь  
 Fig. 1. Rare metal loparite placer deposits of the Lovozero massif: 1 – Revda group of placers, 2 – Seidozero group of placers, 3 – Rajewka placer

ным) и водно-ледниковым отложениям местного происхождения.

Наиболее детально изучены и разведаны россыпи северного подножья массива. Это слабонаклонные к северу пластовые выдержанные залежи, сложенные толщей валунно-галечных отложений в песчаном заполнителе, преимущественно эгирин-полевошпатового состава мощностью от 5 до 72 м (средняя 30 м). Основная масса лопарита концентрируется в глинистых песках класса  $-1,0...+0,14$  мм. Средние содержания лопарита в этой залежи, оцененной по бортовому содержанию  $2,0$  кг/м<sup>3</sup>, составляют  $2,6$  кг/м<sup>3</sup>. Подсчитанные запасы составляют примерно 15% запасов коренных месторождений, разрабатываемых Ловозерским горно-обогатительным комбинатом (ГОК).

Россыпи южного и восточного флангов массива (Райяврская, Сейдозерская и участка Прибрежного) уступают россыпям Ревдинской группы как по запасам, так и по содержаниям. В целом лопаритовые россыпи Ловозерского массива, в первую очередь россыпи Ревдинского россыпного поля, в силу легкой доступности и хорошей обогатимости могут рассматриваться как важный резерв обеспечения сырьевой базы Ловозерского ГОКа [11].

Техногенные отвалы Ловозерского ГОКа на содержание рудных компонентов не исследовались. Учитывая содержание полезных компонентов в отработанных рудах и извлечение лопарита в концентрат на уровне 75—80% [12], можно предположить содержание в отвалах  $0,07\%$  Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,  $0,0\%$  Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,  $0,27\%$  ΣTR<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Лопарит обладает повышенной транспортабельностью. В результате перемыва лопаритоносных водноледниковых отложений и выноса лопарита в береговую зону Белого моря сформировались пляжевые лопаритсодержащие россыпи Терского берега, локализованные на участке аккумулятивно-го строения в устье рек Варзуга-Индер протяженностью около 15 км в виде нескольких обогащенных линзообразных тел, приуроченных к плейстоценовой террасе и современному штормовому валу. Лопарит присутствует в россыпях совместно с ильменитом, цирконом, гранатом, магнетитом, сфеном, а также амфиболами, пироксенами и минералами группы эпидота. Россыпная металлоносность связана с современными пляжевыми песками и с отложениями плейстоцен-голоценовой морской террасы. Объемы рудных песков невелики, но они легко обогатимы, восстанавливаясь после сезонных штормов, и могут быть рентабельно отработаны мобильным обогатительным комплексом. Экологические проблемы могут решаться за счет технологии сухого обогащения.

#### *Техногенные россыпи Кольского полуострова*

Большие объемы потенциального редкометалльного сырья сосредоточены в отходах АО «Апатит», добывающего апатитовые руды Хибинских месторождений. За время работы предприятия накоплено

примерно 1 млрд т отходов, включающих порядка 500 млн т нефелина, более 20 млн т сфена, около 40 млн т апатита, в составе которых содержатся ниобий, тантал, титан, РЗЭ и другие полезные компоненты. Технологическими исследованиями установлена возможность получения из хвостов обогащения сфенового концентрата, содержащего  $28,3\%$  TiO<sub>2</sub>,  $0,38\%$  Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,  $0,026\%$  Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и  $0,5—0,7\%$  TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В 1 млн т сфена содержится 360—370 тыс. т диоксида титана, 260 т пентоксида тантала, 3700 т пентоксида ниобия, 7 тыс. т TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, т. е. количества, соответствующие среднему по масштабам месторождению каждого из перечисленных редких металлов. При 50%-ном извлечении только из текущих хвостов ежегодно можно получать 106 т тантала, 1300 т ниобия, 2—3 тыс. т РЗМ [13]. Отсутствие эффективной технологии утилизации комплексных отходов АО «Апатит» не позволяет считать эти вторичные полиминеральные концентрации техногенным месторождением, хотя интерес к их утилизации будет усиливаться по мере истощения запасов для открытой разработки [14].

Фосфогипс, представляющий собой отходы сернокислой переработки апатитовых концентратов, рассматривается как возможный источник редких металлов. При переработке апатитовых руд хибинских месторождений, содержащих  $0,7—1,1\%$  РЗМ, примерно 50—60% TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub> переходят в фосфогипс, содержание оксидов в котором составляет около  $0,5\%$  [15].

В настоящее время на территории России в отвалах сосредоточено около 300 млн т фосфогипса, транспортирование и хранение которого связаны с большими капитальными вложениями и эксплуатационными затратами, изъятием из хозяйственного оборота значительных площадей сельскохозяйственных земель. Общие ресурсы таких отвалов оцениваются в  $1,5$  млн т TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Скопления фосфогипса находятся при предприятиях, перерабатывающих апатитовый концентрат сернокислотным методом. Условием рентабельного использования этих отвалов является разработка технологии, при которой РЗМ будут одним из основных или попутных полезных компонентов. Принимая во внимание значительные объемы фосфогипса, комплексный состав и устойчивые содержания в нем скандия и РЗМ (среди которых порядка 10% составляют металлы наиболее дефицитной иттриевой группы), можно утверждать, что комплексная переработка фосфогипса способна обеспечить потребности промышленности в РЗМ и стронции. Содержащиеся в апатитовых концентратах редкие земли в настоящее время не извлекаются, однако на ряде российских предприятий — ПАО «ФосАгро» (Великий Новгород), ОАО «Гидрометаллургический завод» (город Лермонтов Ставропольского края), ГК «Снайград» (город Юбилейный Московской области), АО «ФосАгроЧереповец» (Череповец) — велось опытное производство РЗМ-продукции из апатита и фосфогипса [1].

Таблица 3. Характеристика главных типов балансовых руд массива Томтор

Тип руд	Рудный компонент			
	$Nb_2O_5$	$Y_2O_3$	$TR_2O_3$	$Sc_2O_3$
	Содержание, % / $K_p^*$	Содержание, % / $K_p^*$	Содержание, % / $K_p^*$	Содержание, % / $K_p^*$
Переотложенная кора выветривания (участок Буранный)	6,7/31,9	0,60/12,0	9,53/9,5	0,048/4,8
Кора выветривания по карбонатитам	0,79/3,8	0,17/3,4	3,0/3,0	0,04/4,0
Коренные карбонатиты	0,21	0,05	1,0	0,01

Примечание.  $K_p^*$  — коэффициент обогащения по отношению к коренным рудам.

На Ковдорском техногенном месторождении на 1 января 2012 г. Государственным балансом в хвостах комбината учтены бадделеит-апатит-магнетитовые руды, содержащие бадделеит в количестве 55,8 тыс. т при среднем содержании  $ZrO_2$  0,3%. Извлечение диоксида циркония в высококачественный бадделеитовый концентрат с содержанием  $ZrO_2$  98,46% составляет 27% при переработке первичных руд и 16,4% при переработке лежалых хвостов мокрой магнитной сепарации [13].

*Томторское редкометалльное месторождение*

Месторождение Томтор расположено в северной части Сибирской платформы в восточной краевой части Анабарского кристаллического щита и приурочено к центральной части крупного (диаметром более 15 км) кольцевого концентрически-зонального массива, внешняя зона которого представлена щелочными и нефелиновыми сиенитами, промежуточная — ультрамафитами и центральная (диаметром 6 км) — карбонатитами. Вскрытие массива произошло, вероятнее всего, в девоне и сопровождалось мощным корообразованием. На всех породах массива и особенно на карбонатитах развита площадная кора выветривания латеритного типа мощностью от 20 до 400 м. Наличие зоны усадки, из которой интенсивно выносились растворимые соединения, способствовало образованию эрозионно-структурных депрессий, с которыми связаны наиболее богатые руды Томторского месторождения.

В пределах карбонатитового массива выделяются три типа руд (табл. 3): бедные коренные карбонатиты, коры выветривания по карбонатитам (коэффициент концентрации по отношению к коренным породам  $K_p = 3,0—4,0$ ) и богатые (а по ниобию — ультрабогатые) руды ( $K_p = 4,8—31,9$ ), которые, по мнению большинства исследователей, являются переотложенными корами выветривания (россыпями ближнего сноса), расположенными в локальных

озерных палеодепрессиях [16; 17; 6; 18; 19]. Другая точка зрения предполагает эпигенетическое образование богатых руд за счет нисходящей фильтрации вод, имеющих восстановительный характер и выщелачивающих неустойчивые компоненты [20]. Скорее всего, в образовании уникальных руд Томтора принимали участие оба процесса.

Томторское месторождение имеет небольшие разведанные запасы с уникальными содержаниями ниобия. При бортовом содержании  $Nb_2O_5$  3,5% они составляют 119,3 тыс. т  $TR_2O_3$  (или 0,4% российских запасов), 79 тыс. т  $Nb_2O_5$ , 7,01 т  $Y_2O_3$  и 0,56 т  $Sc_2O_3$ . Прогнозные ресурсы по участку Буранному оцениваются в 100 млн т руды по категории  $P_1$  при содержаниях 8,2%  $TR_2O_3$ , 1,5%  $Nb_2O_5$ , 0,05%  $Sc_2O_5$  [19]. На участках Северном и Южном Томторского рудного поля локализовано около 214,5 тыс. т прогнозных ресурсов  $TR_2O_3$  категории  $P_1$  и 3,8 млн т категории  $P_2$  [1].

Проблемные вопросы Томторского месторождения связаны с технологическими сложностями извлечения из руд полезных компонентов, суровыми климатическими условиями, удаленностью от транспортных магистралей и неразвитой инфраструктурой территории. Томторские руды труднообогатимы в связи с тонкодисперсным характером выделений рудных минералов и их тесными взаимоотношениями, поэтому предполагается схема прямого гидрометаллургического передела природных томторских концентратов, а это, в свою очередь, увеличивает долю транспортных расходов в себестоимости конечного продукта.

В 2015 г. ГУГГП «Якутскгеология» вело геолого-разведочные работы на участках Южный и Северный Томторского месторождения для оценки запасов редкометалльных руд. Ожидается, что по результатам оценочных работ запасы  $\Sigma TR_2O_3$  категорий  $C_1 + C_2$  превысят 1 млн т. Освоение участка Буранный Томторского месторождения в Республи-

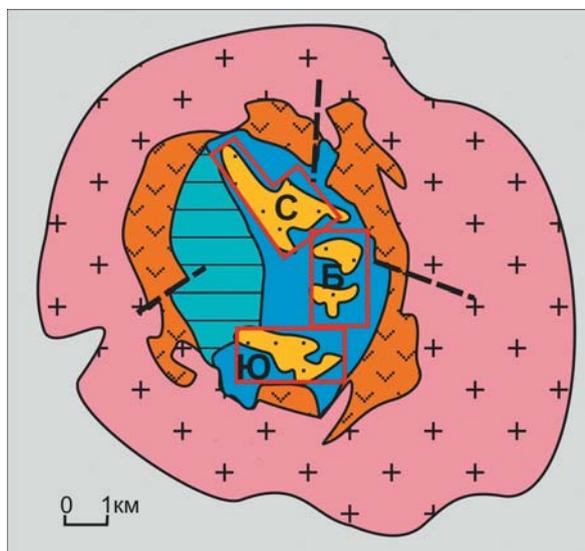


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Томторского массива со снятым мезозой-кайнозойским чехлом по материалам [21]: 1 – щелочные и нефелиновые сиениты, 2 – якупирантит-ийолиты, 3 – карбонатиты безрудные, 4 – карбонатиты рудоносные, 5 – пермские рудоносные алеврито-глинистые отложения, 6 – пермские угленосные конгломераты с прослоями угля

Fig. 2. Schematic geologic map of Tomtor massif with removed the Mesozoic-Cenozoic cover after [21]: 1 – alkaline and nepheline syenites, 2 – yakupirantit-iality, 3 – oreless carbonatite, 4 – ore-bearing carbonatites, 5 – Perm ore-bearing silt-clay deposits, 6 – Permian coal-bearing conglomerate with interlayers of coal

ке Саха (Якутия) ведет компания ООО «Восток Инжиниринг». Во II квартале 2016 г. на нем завершены буровые работы, на 2017—2018 гг. запланированы подготовка технико-экономического обоснования (ТЭО) постоянных разведочных кондиций, подготовка и согласование технического проекта разработки. Запуск объекта в эксплуатацию планируется в 2021 г. [1].

#### Золото-редкометалльные россыпи Куларского узла (Якутия)

До освоения во второй половине XX в. месторождений Маунтин-Пасс в США и Баян-Обо в Китае прибрежно-морские и аллювиальные россыпи монацита были во всем мире главным источником получения РЗМ. Преобладание в составе монацитов легких РЗМ цериевой группы по сравнению с тяжелыми иттриевыми РЗМ, а также повышенное содержание тория (до 3—13%) играют негативную роль в использовании монацитового сырья для получения РЗМ. Это относится в первую очередь к наиболее распространенному «желтому» монациту. В то же время с обнаружением так называемой серой разновидности монацита, получившего название «куларит» по месту его наибольшего обнаружения в Куларских золотых россыпях Якутии [23], появились перспективы разработки этого сырья, поскольку для куларита характерно повышенное содержание европия (до 1%) и пониженное (от 1,5% до практически полного отсутствия) тория [24].

Куларит имеет аутигенно-диагенетическую природу. Его усредненная формула —  $(Ce, Nd, La, Eu)(PO_4)$ . Содержание суммы редких земель в куларитовом концентрате достигает 52,2%, содержания окислов РЗМ (в процентах от  $\Sigma TR_2O_3$ ) составляют: 42,7% Ce, 22,5% Nd, 20,8% La, 7,8% Pr, 2,6% Sm, 1,52% Gd, 0,39% Eu [25].

В промышленных концентрациях куларит впервые был обнаружен в техногенных образованиях золотоносных россыпей Куларского района. Содержание куларита в пределах золотоносных песков составляют около  $1 \text{ кг/м}^3$ , а в хвостах обогащения —  $1,5\text{—}3 \text{ кг/м}^3$ . Ресурсы куларита в пределах узла оцениваются в 25 тыс. т [26]. В 2017 г. ЗАО УГРК «Уранцветмет» на средства федерального бюджета вел доразведку техногенных отвалов Куларского россыпного месторождения в Республике Саха (Якутия), расположенного в муниципальном образовании «Усть-Янский улус (район)». Предусмотрена разработка ТЭО временных разведочных кондиций

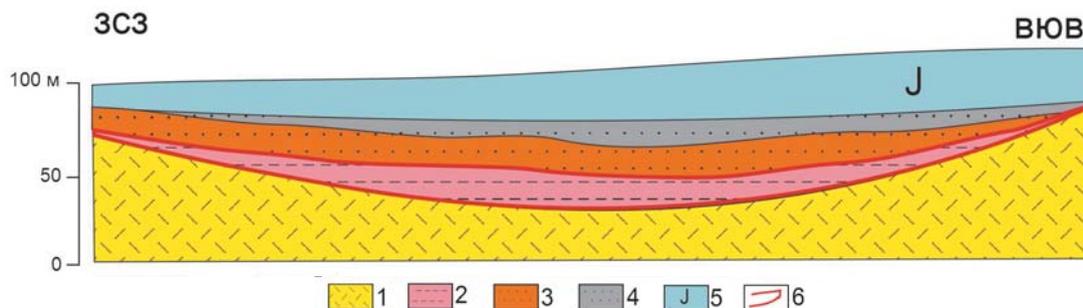


Рис. 3. Схематический геологический разрез участка Буранного по материалам [22]. 1 – породы латеритной коры выветривания карбонатитов, 2 – озерные существенно пелитовые отложения с прослоями алевролитов, 3 – склоновые и аллювиальные красноватые отложения, 4 – аллювиальные угленосные отложения, 5 – границы рудного тела

Fig. 3. Schematic geological cross-section of the Buranny site after [22]. 1 – rocks of laterite weathering crust of carbonatites, 2 – lake essentially pelitic deposits with interlayers of siltstones, 3 – slope and alluvial red color deposits, 4 – alluvial coal-bearing deposits, 5 – boundaries of the ore body

с подсчетом запасов РЗМ и попутного россыпного золота, а также локализация прогнозных ресурсов.

Проявления куларита связаны с черносланцевыми углеродистыми толщами терригенно-метаморфогенных комплексов: кроме Куларской россыпи аналогичный монацит обнаружен в золотых россыпях Южно-Енисейского района, лейкоксеновых россыпях Тимана и ряде других месторождений [27].

В «сером» монаците золото-алмазно-редкометалльно-титанового проявления Ичетью на Тимане содержания РЗМ составляют: 30,6%  $Ce_2O_3$ , 18,5%  $Nd_2O_3$ , 0,56%  $Y_2O_3$ . Характерной особенностью этого монацита является крайне низкое содержание Th, для большинства зерен не превышающее 1 масс. % [28].

Перспективными на выявление монацитовых (куларитовых) россыпей являются Хараулахский антиклинорий Северного Верхоянья и мезозойды Чукотки и Верхней Колымы: «мучнистый», «серый» монацит неоднократно описывался в шлихах и концентратах оловоносных и золотоносных россыпей Чаунского района центральной Чукотки; участки с содержаниями куларита до 3—5  $кг/м^3$  были выявлены в золотоносной россыпи реки Берелех (Магаданская область).

*Россыпи касситерита Восточно-Арктического региона как источники тантала, ниобия, скандия, индия*

Россыпи касситерита являются важным источником олова (50% мировой добычи и 25% в России к 1990 г.). При этом примеси тантала, ниобия, скандия, индия в касситеритах отдельных месторождений могут достигать промышленных концентраций и попутно извлекаться при переработке оловянных концентратов. Оловянные шлаки, в которых содержится 2—10%  $Nb_2O_5$  и приблизительно столько же  $Ta_2O_5$ , являются сырьем для производства ниобия и тантала [29].

Содержание ниобия и тантала в касситерите кварцевой формации достигает соответственно 0,07—9,6  $кг/т$  (среднее 0,24  $кг/т$ ) и 0,65—11,1  $кг/т$  (среднее 0,74  $кг/т$ ), скандия — 0,05—0,6  $г/т$  (среднее 0,17  $г/т$ ). В касситерите турмалинового типа силикатной формации отмечаются пониженные содержания ниобия, тантала и скандия и повышенные — индия (0,05—0,1%) [30]. В колломорфных разновидностях касситерита содержание индия может достигать 1,35% [31].

В связи с этим ресурсы редких металлов, которые могут быть добыты попутно с оловом в россыпях северо-востока России, могут оцениваться следующим образом:  $Nb_2O_5$  — 37 т,  $Ta_2O_5$  — 12 т,  $Sc_2O_3$  — 8,5 т и индия — 10—20 т.

*Редкометалльно-титановые россыпи дальнего сноса (Салехард, Ярега)*

Редкометалльно-титановые («титано-циркониевые») россыпи дальнего сноса являются главным мировым источником циркония и содержат в виде

примесей Hf (в цирконе) и РЗМ (преимущественно в лейкоксене). Арктические области неблагоприятны для развития современных редкометалльно-титановых россыпей, но ископаемые россыпи, образованные в благоприятных климатических обстановках прошлых геологических эпох, встречаются и в полярных областях. По результатам комплексных картографических работ на Салехардской площади Зауральского россыпного района были установлены повышенные концентрации титан-циркониевых минералов. Содержание циркона в песках достигает 35,6  $кг/м^3$  при среднем 7,7  $кг/м^3$ , титановых минералов (ильменита, рутила и лейкоксена) — до 125,9  $кг/м^3$  (среднее 36,6  $кг/м^3$ ). Мощность продуктивного горизонта — 5,6 м. Прогнозные ресурсы Салехардской площади по категории  $P_1 + P_2$  составили: 146 тыс. т  $ZrO_2$ , 969 тыс. т  $TiO_2$ , что соответствует запасам среднего месторождения. Содержание РЗМ в лейкоксене и измененном ильмените не анализировалось.

Государственный баланс запасов учитывает небольшие запасы РЗМ, содержащиеся в лейкоксене и цирконе лейкоксен-кварцевых нефтеносных песков Ярегского месторождения в Республике Коми. ОАО «Ярега Руда» подготавливает к эксплуатации наиболее богатую и выдержанную Нижнюю россыпь. В соответствии с проектом строительства горнохимического комплекса по добыче и переработке титановой руды мощностью 650 тыс. т в год предусматривается попутное извлечение из лейкоксена и циркона редкоземельных элементов, содержание триоксидов в которых в песках Нижней россыпи составляет 0,039% [1].

### Заключение

Несмотря на то что в настоящее время россыпные месторождения не рассматриваются как приоритетные при создании минерально-сырьевой базы стратегических (в том числе и редких) металлов, их преобладание в балансе добычи по сравнению с балансом запасов указывает на повышенный интерес производственных компаний к этому типу месторождений. Это объясняется их определенными технологическими и экономическими преимуществами. По ряду позиций россыпи (включая коры выветривания и техногенные образования) могут в значительной мере обеспечить потребности страны в стратегических металлах.

В вещественном плане россыпи РМ содержат значительную часть списка стратегических металлов, а в генетическом плане представляют практически весь спектр фациальных обстановок от несмещенных кор выветривания, делювиально-склоновых образований до переотложенных кор, гляциальных, аллювиальных, озерных и прибрежно-морских отложений. В пространственном плане они распределены по всей территории Арктики от Кольского полуострова до Чукотки как в освоенных, так и в труднодоступных, удаленных от побережья, логистически

сложных районах. В технологическом плане среди них преобладают простые легкообогатимые руды, но присутствуют и технологически сложные руды, требующие применения разнообразных современных методов обогащения и извлечения полезных компонентов.

Меняющаяся прямо на глазах (не в лучшую сторону) мировая политическая обстановка настоятельно требует от России создания собственной действующей сырьевой базы стратегических редких металлов, причем делать это придется в кратчайшие сроки и в условиях дефицита кредитных средств. В такой ситуации россыпные месторождения могут выступить в виде первоочередного, быстро осваиваемого, технологически простого и экономически эффективного ресурса, способного выступить локомотивом при освоении новых или реанимации старых рудно-россыпных площадей.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-05-00113 и программы Президиума РАН № 55 «Арктика — научные основы новых технологий освоения, сохранения и развития».

### Литература

1. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2015 году». — М.: ВИМС-Минерал-Инфо, 2016. — 344 с.
2. Некрасов Е. М. Важнейшие геолого-промышленные типы месторождений золота в XXI веке // Минер. ресурсы России: Экономика и управление. — 2000. — № 5—6. — С. 53—56.
3. Быховский Л. З., Спорыхина Л. В. Россыпные месторождения в сырьевой базе и добыче полезных ископаемых // Минер. ресурсы России: Экономика и управление. — 2013. — № 6. — С. 6—7.
4. Лаломов А. В., Бочнева А. А., Чефранов Р. М., Чефранова А. В. Россыпные месторождения Арктической зоны России: современное состояние и пути развития минерально-сырьевой базы // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 2 (18). — С. 66—77.
5. Лаломов А. В., Ремизова Л. И. Основные направления создания импортонезависимой титановой и циркониевой промышленности России // Россыпи и месторождения кор выветривания (РКВ-2015). — Пермь: ПГНИУ, 2015. — С. 129—131.
6. Россыпные месторождения России и других стран СНГ / Отв. ред. Н. П. Лаверов, Н. Г. Патык-Кара. — М.: Науч. мир, 1997. — 479 с.
7. Рябцев В. В., Чистов Л. Б., Шурига Т. Н. Танталовые руды России: состояние и перспективы освоения минерально-сырьевой базы. — М.: ВИМС, 2006. — 92 с.
8. Пикалова В. С. Геолого-экономическая оценка нового потенциально-промышленного типа ниобиевых руд на примере Большетагнинского месторождения: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. — М.: ВИМС, 2018. — 25 с.
9. Никишина Е. Е., Дробот Д. В., Лебедева Е. Н. Ниобий и тантал: состояние мирового рынка, области применения, сырьевые источники // Изв. вузов. Цветная металлургия. — 2014. — № 1. — С. 29—41.
10. Твердов А. А. Редкие металлы Ловозерского массива // Редкие земли. — 2016. — № 3 (8). — С. 164—169.
11. Коноплева Н. Г. Технично-экономическое обоснование временных кондиций на руды Ревдинского россыпного месторождения лопарита. — Л., 1989. — 276 с.
12. Прогнозно-геологические модели месторождений и их прикладное значение (черные, цветные, редкие, легирующие металлы и нерудное сырье): Ниобий / ВИМС. — М., 2011. — 123 с.
13. Быховский Л. З., Спорыхина Л. В., Ануфриева С. И. Техногенные месторождения и образования редких металлов России // Рациональное освоение недр. — 2014. — № 3. — С. 14—22.
14. Техногенные минерально-сырьевые ресурсы / Под ред. Б. К. Михайлова. — М.: Науч. мир, 2012. — 236 с.
15. Быховский Л. З., Тигунов Л. П. Стратегическое минеральное сырье: пути решения проблемы дефицита // Минер. ресурсы России: Экономика и управление. — 2015. — № 5. — С. 43—49.
16. Коноплев А. Д., Кузьмин В. И., Эпштейн Е. М. Геолого-минералогические особенности делювиально-озерной россыпи на коре выветривания редкометалльных карбонатитов // Минералогия и геохимия россыпей. — М.: Наука, 1992. — С. 111—124.
17. Эпштейн Е. М., Данильченко Н. А., Постников С. А. Геология Томторского уникального месторождения редких металлов (север Сибирской платформы) // Геология руд. месторождений. — 1994. — № 2. — С. 83—100.
18. Мелентьев Г. Б., Самсонов А. В. Зачем и кому нужен Томтор? // Химия и бизнес. — 2009. — № 2. — URL: [http://www.newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=6497&cat\\_id=5&page\\_id=2](http://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=6497&cat_id=5&page_id=2).
19. Быховский Л. З., Котельников Е. И., Лихневич Е. Г., Пикалова В. С. Задачи дальнейшего изучения Томторского рудного поля с целью повышения его инвестиционной привлекательности // Разведка и охрана недр. — 2014. — № 9. — С. 20—25.
20. Лапин А. В., Толстов А. В. Месторождения кор выветривания карбонатитов. — М.: Наука, 1995. — 208 с.
21. Быховский Л. З., Потанин Д. С., Котельникова Е. И. Редкоземельное и скандиевое сырье России. — М.: ВИМС, 2016. — 217 с.
22. Коноплев А. Д., Толстов А. В., Васильев А. Т. и др. Особенности локализации редкометалльного оруднения на месторождении Томтор // Редкометалльно-урановое рудообразование в осадочных породах: Сборник научных трудов. — М.: Наука, 1995. — С. 223—241.
23. Некрасова Р. Я., Некрасов И. Я. Куларит — аутигенная разновидность монацита // Докл. АН СССР. — 1983. — № 3. — С. 688—693.

## Изучение и освоение природных ресурсов Арктики

24. Кремененцкий А. А. Новый геолого-промышленный тип редкоземельных россыпей // Разведка и охрана недр. — 1993. — № 3. — С. 15—19.
25. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых: Россыпные месторождения. — М.: ГФУ ГКЗ, 2007. — 66 с.
26. Таракановский В. И., Лутай В. В. О проблемах добычи редкоземельных металлов в Республике Саха (Якутия) // Золотодобывающая пром-сть. — 2012. — № 6. — URL: [http://nedradv.ru/news/branch/?id\\_obj=a827795f5cd65bbceb66b2480505a2e8](http://nedradv.ru/news/branch/?id_obj=a827795f5cd65bbceb66b2480505a2e8).
27. Семенов Е. И. Оруденение и минерализация редких земель, тория и урана (лантаноидов и актиноидов). — М.: ГЕОС, 2001. — 307 с.
28. Макеев А. В., Вирюс А. А. Монацит проявления Ичетью (состав, морфология, возраст) // Изв. вузов. Геология и разведка. — 2013. — № 3. — С. 10—15.
29. Методические рекомендации по применению Классификации запасов к месторождениям оловянных руд / М-во природ. ресурсов Рос. Федерации. — М.: ГФУ ГКЗ, 2005. — 49 с.
30. Флеров Б. Л., Бичус Б. Я., Яковлев Я. В., Холмогоров А. И. Некоторые типоморфные особенности касситеритов Якутии // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. — 1980. — Вып. 2. — С. 174—186.
31. Иванов В. В. Самородный индий // Геохимия, минералогия и генетические типы месторождений редких элементов. — Т. 2. — М., 1964. — С. 568—569.

### Информация об авторах

Лаломов Александр Валерианович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: lalomov@mail.ru.

Бочнева Анна Александровна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: bochneva@mail.ru.

### Библиографическое описание данной статьи

Лаломов А. В., Бочнева А. А. Редкометалльный потенциал россыпей и кор выветривания российской Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 4 (32). — С. 111—122. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-111-122.

## RARE-METAL POTENTIAL OF PLACER DEPOSITS AND WEATHERING CRUSTS OF THE RUSSIAN ARCTIC

Lalomov A. V., Bochneva A. A.

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (Moscow, Russian Federation)

### Abstract

Rare-metal deposits of placers, weathering crusts (saproelite) and mining tails have significant raw material potential due to significant volumes of natural and dump rare-metal deposits, their high profitability, rapid return on investment and technological availability of enrichment. The Arctic zone of Russia contains the following natural and dump rare-metal deposits: loparite placers of the Lovozero massif, dumps of apatite ores of the Khibini deposit group, baddeleyite dumps of the Kovdorskoye deposit (the Kola Peninsula), ultra-rich hypergenically altered sedimentary ores of the Tomtor deposit and gold-rare metal dumps of the Kular range (Yakutia), rare-metal-titanium placers of Salekhard and Timan, tin-bearing ores of Chukotka and Yakutia, which contain niobium, tantalum, indium and scandium as admixtures. Natural placers, weathering crusts and dumps in a short time can provide the needed raw materials for Russian rare-metal industry.

**Keywords:** rare metals, placer deposits, dumps, the Arctic zone of Russia.

The article was received on June 6, 2018

The work is executed with financial support of the RFBR grant 18-05-00113 and Programs of the RAS Presidium No. 55 "The Arctic — the scientific base of new technologies for exploitation, preservation and development".

## References

1. Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'evykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2015 godu". [State Report "About the state and using of mineral raw materials of Russian Federation in 2015"]. Moscow, VIMS-Mineral-Info, 2016, 344 p. (In Russian).
2. Nekrasov E. M. Vazhneishie geologo-promyshlennye tipy mestorozhdenii zolota v XXI veke. [Most important geological-industrial types of the gold deposits in XXI century]. Miner. resursy Rossii: Ekonomika i upravlenie, 2000, no. 5—6, pp. 53—56. (In Russian).
3. Bykhovskii L. Z., Sporykhina L. V. Rossyppnye mestorozhdeniya v syr'evoi baze i dobyche poleznykh iskopayemykh. [Placers in the raw material base and mining of mineral deposits]. Miner. resursy Rossii: Ekonomika i upravlenie, 2013, no. 6, pp. 6—7. (In Russian).
4. Lalomov A. V., Bochneva A. A., Chefranov R. M., Chefranova A. V. Rossyppnye mestorozhdeniya Arkticheskoi zony Rossii: sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya mineral'no-syr'evoi bazy. [Placer deposits of Arctic zone of Russia: present-day condition and paths of the development of mineral raw materials base]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2015, no. 2 (18), pp. 66—77. (In Russian).
5. Lalomov A. V., Remizova L. I. Osnovnye napravleniya sozdaniya importonezavisimoi titanovoi i tsirkonievoy promyshlennosti Rossii. [Main paths of development of import-independent titanium and zirconium industry of Russia]. Rossyppi i mestorozhdeniya kor vyvetrivaniya (RKV-2015). Perm', PGNIU, 2015, pp. 129—131. (In Russian).
6. Rossyppnye mestorozhdeniya Rossii i drugikh stran SNG. [Placer mineral deposits of Russia and other CIS countries]. Otv. red. N. P. Laverov, N. G. Patyk-Kara. Moscow, Nauch. mir, 1997. 479 p. (In Russian).
7. Ryabtsev V. V., Chistov L. B., Shuriga T. N. Tantalovy rudy Rossii: sostoyanie i perspektivy osvoeniya mineral'no-syr'evoi bazy. [Tantalum ores of Russia: conditions and perspectives of developing of mineral raw material base]. Moscow, VIMS, 2006, 92 p. (In Russian).
8. Pikalova V. S. Geologo-ekonomicheskaya otsenka novogo potentsial'no-promyshlennogo tipa niobievnykh rud na primere Bol'shetagninskogo mestorozhdeniya. [Geological and economic estimation of new potentially industrial type of niobium ores with an example of Bolshetagninsky mineral deposit]. Avtoref. dis. ... kand. geol.-mineral. nauk. Moscow, VIMS, 2018. 25 p. (In Russian).
9. Nikishina E. E., Drobot D. V., Lebedeva E. N. Niobii i tantal: sostoyanie mirovogo rynka, oblasti primeneniya, syr'evye istochniki. [Niobium and tantal: condition of the world market, field of application, sources of raw material]. Izv. vuzov. Tsvetnaya metallurgiya, 2014, no. 1, pp. 29—41. (In Russian).
10. Tverdov A. A. Redkie metally Lovozerskogo massiva. [Rare metals of Lovozero intrusive massif]. Redkie zemli, 2016, no. 3 (8), pp. 164—169. (In Russian).
11. Konopleva N. G. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie vremennykh konditsii na rudy Revdinskogo rossyppnogo mestorozhdeniya loparita. [Technical-economic basement for short-term conditions for the ores of Revda placer deposit of loparite]. Leningrad, 1989, 276 p. (In Russian).
12. Prognozno-geologicheskie modeli mestorozhdenii i ikh prikladnoe znachenie (chernye, tsvetnye, redkie, legiruyushchie metally i nerudnoe syr'e): Niobii. [Application meaning of the forecasting geological models of the mineral deposits]. VIMS. Moscow, 2011, 123 p. (In Russian).
13. Bykhovskii L. Z., Sporykhina L. V., Anufrieva S. I. Tekhnogennye mestorozhdeniya i obrazovaniya redkikh metallov Rossii. [Technogeny mineral deposits and formations of rare metals of Russia]. Ratsion. osvoenie nedr, 2014, no. 3, pp. 14—22. (In Russian).
14. Tekhnogennye mineral'no-syr'evye resursy. [Technogenic mineral resources]. Pod red. B. K. Mikhailova. Moscow, Nauch. mir, 2012, 236 p. (In Russian).
15. Bykhovskii L. Z., Tigunov L. P. Strategicheskoe mineral'noe syr'e: puti resheniya problemy defitsita. [Strategic mineral raw material: means of solution of the problem of the deficit]. Miner. resursy Rossii: Ekonomika i upravlenie, 2015, no. 5, pp. 43—49. (In Russian).
16. Konoplev A. D., Kuz'min V. I., Epshtein E. M. Geologo-mineralogicheskie osobennosti delyuvial'no-ozernoi rossyppi na kore vyvetrivaniya redkometall'nykh karbonatitov. [Geological and mineralogical features of the slope-lake placer deposit on the weathering crusts of rare metal carbonatites]. Mineralogiya i geokhimiya rossypei. Moscow, Nauka, 1992, pp. 111—124. (In Russian).
17. Epshtein E. M., Danil'chenko N. A., Postnikov S. A. Geologiya Tomtorskogo unikal'nogo mestorozhdeniya redkikh metallov (sever Sibirskoi platformy). [Geology of Tomtor unique mineral deposits of rare metals (northern Siberian platform)]. Geologiya rud. mestorozhdenii, 1994, no. 2, pp. 83—100. (In Russian).
18. Melent'ev G. B., Samsonov A. V. Zachem i komu nuzhen Tomtor? [Who need Tomtor deposit and why?]. Khimiya i biznes, 2009, no. 2. Available at: [http://www.newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=6497&cat\\_id=5&page\\_id=2](http://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=6497&cat_id=5&page_id=2). (In Russian).
19. Bykhovskii L. Z., Kotel'nikova E. I., Likhnikovich E. G., Pikalova V. S. Zadachi dal'neishego izucheniya Tomtorskogo rudnogo polya s tsel'yu povysheniya ego investitsionnoi privlekatel'nosti. [The tasks of the following research of Tomtor ore field for increasing of investment attraction]. Razvedka i okhrana nedr, 2014, no. 9, pp. 20—25. (In Russian).
20. Lapin A. V., Tolstov A. V. Mestorozhdeniya kor vyvetrivaniya karbonatitov. [Mineral deposits of the weathering crusts of carbonatites]. Moscow, Nauka, 1995, 208 p. (In Russian).
21. Bykhovskii L. Z., Potanin D. S., Kotel'nikova E. I., Anufrieva S. I., Arkhangel'skaya V. V., Igrevskaya L. V., Likhnevich E. G., Sporykhina L. V. Redkozemel'noe i skandievoe

syr'e Rossii. [Rare earth and scandium raw material of Russia]. Moscow, VIMS, 2016, 217 p. (In Russian).

22. Konoplev A. D., Tolstov A. V., Vasil'ev A. T., Nechelyustov G. N., Kuz'min V. I., Sklyadneva V. M., Dubinchuk V. T., Konopleva E. V., Sidorenko G. A. Osobennosti lokalizatsii redkometall'nogo orudneniya na mestorozhdenii Tomtor. [Features of localization of rare metal mineralization on the Tomtor mineral deposit]. Redkometall'no-uranovoe rudoobrazovanie v osadochnykh porodakh: Sbornik nauchnykh trudov. Moscow, Nauka, 1995, pp. 223—241. (In Russian).

23. Nekrasova R. Ya., Nekrasov I. Ya. Kularit — autigenaya raznovidnost' monazita. [Kularite — autigenic variation of monazite]. Dokl. AN SSSR, 1983, no. 3, pp. 688—693. (In Russian).

24. Kremenetskii A. A. Novyi geologo-promyshlenniy tip redkozemel'nykh rossypei. [New geological industrial type of rare earth metal placer deposits]. Razvedka i okhrana nedr, 1993, no. 3, pp. 15—19. (In Russian).

25. Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu Klassifikatsii zapasov mestorozhdenii i prognozykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh: Rossypnye mestorozhdeniya. [Manual for classification of the resources and reserves of hard mineral deposits. Placer mineral deposits]. Moscow, GFU GKZ, 2007, 66 p. (In Russian).

26. Tarakanovskii V. I., Lutai V. V. O problemakh dobychi redkozemel'nykh metallov v Respublike Sakha (Ya-

kutiya). [About the problem of mining of rare earth metals in the republic Sakha (Yakutiya)]. Zolotodobyvayushchaya prom-st', 2012, no. 6. Available at: [http://nedradv.ru/news/branch/?id\\_obj=a827795f5cd65bbc eb66b2480505a2e8](http://nedradv.ru/news/branch/?id_obj=a827795f5cd65bbc eb66b2480505a2e8). (In Russian).

27. Semenov E. I. Orudnenie i mineralizatsiya redkikh zemel', toriya i urana (lantanoidov i aktinidov). [Mineralization of rare earth elements, thorium and uranium]. Moscow, GEOS, 2001, 307 p. (In Russian).

28. Makeev A. V., Viryus A. A. Monazit proyavleniya lchet'yu (sostav, morfologiya, vozrast). [Monazite of lchet'iu deposit (constitution, morphology, age)]. Izv. vuzov. Geologiya i razvedka, 2013, no. 3, pp. 10—15. (In Russian).

29. Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu Klassifikatsii zapasov k mestorozhdeniyam olovyannykh rud. [Manual for classification of the mineral deposits of tin]. M-vo prirod. resursov Ros. Federatsii. Moscow, GFU GKZ, 2005, 49 p. (In Russian).

30. Flerov B. L., Bichus B. Ya., Yakovlev Ya. V., Kholmogorov A. I. Nekotorye tipomorfnye osobennosti kassiteritov Yakutii. [Some typomorphic features of cassiterites of Yakutiya]. Zap. vsesoyuz. mineral. o-va, 1980, iss. 2, pp. 174—186. (In Russian).

31. Ivanov V. V. Samorodnyi indii. [Native indium]. Geokhimiya, mineralogiya i geneticheskie tipy mestorozhdenii redkikh elementov. Vol. 2. Moscow, 1964, pp. 568—569. (In Russian).

### Information about the authors

*Lalomov Alexander Valerianovich*, Doctor of Sciences, Leading Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (35, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: lalomov@mail.ru.

*Bochneva Anna Aleksandrovna*, Ph.D., Senior Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (35, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: bochneva@mail.ru.

### Bibliographic description

*Lalomov A. V., Bochneva A. A.* Rare-metal potential of placer deposits and weathering crusts of the Russian Arctic. Arctic: ecology and economy, 2018, no. 4 (32), pp. 111—122. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-111-122. (In Russian).

© Lalomov A. V., Bochneva A. A., 2018