

## **ФОРМИРОВАНИЕ НОВЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВЫХ ИСТОЧНИКОВ СЫРЬЯ НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)**

*Виктор Анатольевич Яценко*

Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 17, научный сотрудник, тел. (383)330-09-62, e-mail: yva@ieie.nsc.ru

В работе делается ретроспективный анализ открытия и идентификации редкоземельных металлов (РЗМ). По мере научно-технологического прогресса их потенциал продолжает раскрываться, появляются новые высокотехнологичные продукты, для производства которых необходим данный вид сырья. В итоге появляется спрос, который через предложение побуждает осваивать и вовлекать в оборот новые типы и источники редкоземельных минерально-сырьевых ресурсов.

**Ключевые слова:** редкоземельные металлы, редкоземельные минералы, Томтор, спрос, предложение, технологии

## **FORMING NEW RARE EARTH RESOURCES ON THE EXAMPLE OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)**

*Viktor A. Yatsenko*

Institute of Economics and Industrial Engineering of SB RAS, 17, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (383)330-09-62, yva@ieie.nsc.ru

The paper makes retrospective analysis of discovering and identifying rare earth metals. Their potential is still being opened by scientific and technological progress. Moreover, this type of raw material is used for production of new high-tech products. As a result, demand appeared stimulates supply. In turn, greater supply stimulates developing and involving new type of rare earths sources.

**Keywords:** rare earth metals, rare earth minerals, Tomtor, demand, supply, technologies

### *Введение*

История редкоземельных металлов (РЗМ) началась примерно с 1787 г., когда шведский артиллерийский офицер Карл Аксель Аррениус, увлекавшийся минералогией, нашёл тёмный минерал в карьере полевого шпата недалеко от шведской деревни Иттерби на острове Ресарё [1]. В 1794 г. финский химик Йоханнес Гадолин, изучавший этот минерал, обнаружил новый элемент, который был назван итрит, а позже гадолинит. Оказалось, что в этом минерале было девять элементов (названных редкими землями), на открытие которых в дальнейшем потребовалось около 100 лет. Наконец, в 1945 г. американские химики в лабораторных условиях выделили радиоактивный элемент – прометий, названный в честь титана Прометея из греческой мифологии [1]. В итоге потребовалось более 150 лет, чтобы открыть и идентифицировать

все 17 редкоземельных элементов: лантан (La), церий (Ce), празеодим (Pr), неодим (Nd), прометий (Pm), самарий (Sm), европий (Eu), гадолиний (Gd), тербий (Tb), диспрозий (Dy), гольмий (Ho), эрбий (Er), тулий (Tm), иттербий (Yb), лютеций (Lu), скандий (Sc) и иттрий (Y).

### *Новые технологии стимулируют спрос на РЗМ*

Практическое использование РЗМ началось лишь с 1885 г., когда Карл Ауэр фон Вельсбах открыл яркое свечение оксидов церия и других РЗМ при высоких температурах. Так появилось производство газонакалильных сеток (изготавливались из оксида тория с добавкой 1% оксида церия) для осветительных газовых и керосиновых фонарей. Затем фон Вельсбах расплавил церий с железом и изобрёл искусственный кремний для зажигалок, состоящий из мишметалла и цериево-железного сплава, который успешно используется и в настоящее время. Тогда же было обнаружено функциональное использование церия для производства стекла и защиты от ультрафиолета. В результате в 1900 г. Карл Ауэр фон Вельсбах основал большую химическую лабораторию на металлургическом заводе в городе Трайбах (Австрия), на основе которого возникла компания Treibacher Industrie AG [1, 1, 3].

Однако промышленное использование РЗМ началось с развитием цветного телевидения. В 1953 г. новая технология аналогового цветного телевидения компании RCA была принята Национальным Комитетом по Телевизионным Стандартам США (NTSC), и стала единым вещательным стандартом в стране [4]. С этого момента началось серийное производство цветных телевизоров, для производства которых использовался европий как активный компонент красных и синих люминофоров в цветных экранах (красный: вначале  $YVO_4:Eu^{3+}$ , позже  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$ ,  $Y_2O_3:Eu^{3+}$  и синий:  $BaMgAl_{10}O_{17}:Eu^{2+}$ ) [5].

Эра европия продлилась до 1970-ых годов, когда на смену ферритовым пришли самарий-кобальтовые постоянные магниты ( $SmCo_5$ ,  $Sm_2Co_{17}$ ), разработанные в лаборатории Air Force Material Research (США). В настоящее время доля рынка таких магнитов составляет менее 2%, чего не скажешь о неодимовых магнитах ( $Nd_2Fe_{14}B$ ), которые не имели промышленного значения до 1985 года. Развитие микроэлектроники, аэрокосмических технологий, технологий в здравоохранении и в чистой энергетике (ветрогенераторы, гибридные и электромобили) сделали неодим, празеодим, тербий и диспрозий наиболее востребованными редкоземельными металлами в настоящее время.

Применение новых знаний, технологий и рост масштаба производства, связанные с современной динамикой развития общества, привело к стремительному росту потребления различных минерально-сырьевых ресурсов. Постепенное истощение ранее освоенных и вовлеченных в оборот источников сырья вынуждает осваивать новые типы и источники полезных ископаемых, в том числе редкоземельных металлов.

## Спрос на РЗМ стимулирует предложение

Промышленное применение европия привело к резкому скачку мировой добычи и обогащению РЗМ с выделением этого критически важного элемента (рис. 1). До 1952 г. основным сырьём на тот момент был монацитовый песок<sup>14</sup>, который поставляли в основном из США, Австралии, Бразилии и Индии [0, 6]. В дальнейшем добыча и выделение РЗМ из песков существенно сократилась, поскольку они содержат радиоактивный торий, который может замещать церий в минерале.

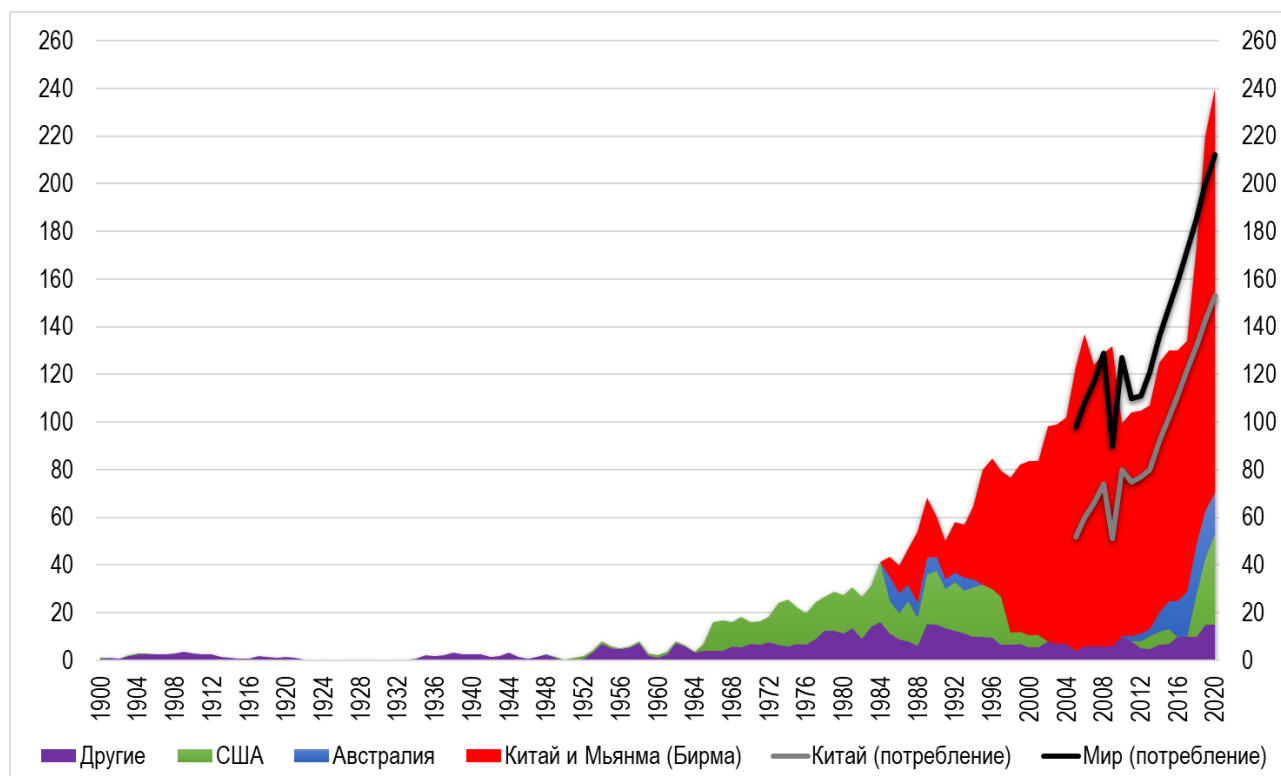


Рис. 1: Мировое производство (1900 – 2020 гг.) и потребления (2005–2020 гг.) РЗМ (в пересчёте на оксиды), тыс. т

В 1952 г. началась добыча и обогащение бастнезитовых карбонатитов<sup>15</sup> на месторождении Mountain pass (США, Калифорния), а с 1965 до 1984 гг. оно стало основным источником лёгких РЗМ<sup>16</sup> (в частности, лантана, церия, неодима и европия) [7]. Однако за этот период времени тяжёлые РЗМ<sup>16</sup> получали полностью из монацита [1]. В связи с усилившейся конкуренцией на рынке со стороны Китая и с ужесточением экологических норм и требований к производству и пере-

<sup>14</sup> Монацит обычно обозначается как [(Ce, La, Y, Th) PO<sub>4</sub>], реже [Ce (PO<sub>4</sub>)].

<sup>15</sup> Химическая формула бастнезита – [(Ce, La) (CO<sub>3</sub>) F].

<sup>16</sup> В научной литературе обычно РЗМ разделяют на две группы по их атомному весу: лёгкие (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu) и тяжёлые (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y).

работке минерально-сырьевых ресурсов в США месторождение Mountain Pass было закрыто и законсервировано с 2002 по 2010 гг. и с 2016 по 2018 гг. [8].

В 1950-х годах началась добыча монацитовых и бастнезитовых руд на месторождении Баян-Обо (Китай, Внутренняя Монголия), хотя месторождение было открыто еще в конце 1920-х годов. Сегодня это месторождение является одним из основных источников редкоземельных элементов в мире при том, что они являются побочным продуктом добычи и обогащения железной руды на месторождении.

Дальнейший поиски РЗМ в Китае позволили открыть новые бастнезитовые источники в провинции Сычуань. На Юго-Востоке Китая в качестве сырья для выделения РЗМ используют латеритные глины. Так, в нескольких провинциях вокруг Цзянсидобывают ионно-адсорбирующие глины, которые стали основным поставщиком таких легких и тяжелых РЗМ, как Gd, Tb, Lu, Sc, Y и Dy, особенно необходимые для улучшения температурной стабильности постоянных неодимовых магнитов. Однако в рамках ужесточения экологического законодательства добыча на всех рудниках была остановлена с 2016 г., поскольку использовалась технология выщелачивания с использованием, например, растворов сульфата аммония. Поэтому для поддержки национальных компаний ионно-адсорбирующие глины для выделения РЗМ начали импортировать из Мьянмы (Бирмы) (Рис. 1) [9]. При этом существуют опасения, что этот тип источника РЗМ будет в ближайшие годы истощён, и тогда основным источником тяжелых РЗМ в Китае останется одно месторождение ксенотима<sup>17</sup> в провинции Гуандун [0].

За последние 10 лет австралийская компания Lynas начала добычу на одном из лучших в мире редкоземельных месторождений – MountainWeld (Западная Австралия), в котором РЗМ содержатся в фосфатах и алюмофосфатах (Рис. 1 [10]). В Бразилии компания Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (СВММ) получает концентрат из монацитовой руды, как побочный продукт добычи и переработки гигантского ниобиевого месторождения в городе Araxá (штат Minas Gerais) [11]. На месторождении Serra Verde в Minaçu (штат Goiás) из ионных глин сегодня производят такое же количество концентрата РЗМ, как и на Araxá [12]. В Индии добычей и отделением песчаных минералов<sup>18</sup> в южной части страны в Aluva, Chavara (штат Kerala), Manavalakurichi (штат Tamilnadu) и на перспективном месторождении Orissa в Chatrapur (штат Odisha) занимается государственная компания Indian Rare Earths Limited (IREL) под управлением Департамента атомной энергии (Department of Atomic Energy) [13].

По всему миру насчитывается более 70 перспективных источников редкоземельного сырья. Самыми многообещающими являются месторождения Serra Verde (Бразилия), Kerala, Orissa (Индия), Kvanefjeld (Гренландия), Norra Kärr (Швеция), Dubbo Zirconia от Alkane Resources Ltd. (Австралия), проект Nolans от ArafuraResourcesLtd (Австралия), LemhiPass, IdahoandMontana; DiamondCreek, Idaho; BearLodge, Wyoming, andBokanMountain, Alaska, а также проекты из раз-

<sup>17</sup>Химическая формула ксенотима – [(Y, Yb) (PO<sub>4</sub>)].

<sup>18</sup> В стране находится почти 35% общемировых песчаных месторождений, которые являются мощными источниками, как лёгких, так и тяжелых РЗМ.

личных промышленных отходов и вторичного сырья, глубоководных пород, угольной золы и т.д. [14].

Например, в 2011 г. японские ученые провели исследования морского дна Тихого океана, и обнаружили новую геологическую среду как новый потенциальный редкоземельный ресурс. Однако исследования показывают, что добыча с больших глубин (4–5 км) в настоящее время невозможно с экономической и технологической точек зрения – потенциал добычи и обогащения в среднесрочной и долгосрочной перспективе [15].

### **Формирование новых источников редкоземельного сырья на примере Республики Саха (Якутия)**

Российская Федерация располагает одной из крупнейших в мире МСБ РЗМ. Об этом свидетельствует статистика Геологической службы США, по данным которой в 2017 году российские резервы составляли 18 миллионов тонн доказанных запасов РЗМ (в пересчёте на оксиды), что составляет 15% от общемировых запасов. В то же самое время Государственным балансом запасов полезных ископаемых Российской Федерации учтено 17 месторождений с запасами РЗМ в количестве 26,9 миллионов тонн  $\Sigma TR_2O_3$ , что составляет примерно 19 – 21% от мировых запасов в 2017 году. В распределённом фонде недр – 13 месторождений, заключающих 45,4% запасов РЗМ по категориям А+В+С<sub>1</sub>+С<sub>2</sub>, из которых 2% разрабатываются и 3% осваиваются. В нераспределённом фонде недр – 4 месторождения, заключающих в себе 54,6% запасов РЗМ. Ресурсный потенциал существенно меньше, хотя и отличается высокой степенью изученности – прогнозные ресурсы категории Р<sub>1</sub> оценены почти в 8 млн т, категории Р<sub>2</sub> – в 6,2 млн т. Все они находятся в нераспределённом фонде недр [16].

В последние годы динамика добычи РЗМ в России растёт и на 2017 год составила 115,8 тыс. т  $\Sigma TR_2O_3$ , однако от этого количества менее 5% поступает на дальнейшую переработку (рис. 2). Дело в том, что российская минерально-сырьевая редкоземельная база в основном состоит из апатит-нефелиновыми и лопаритовыми рудами, суммарное содержание РЗМ в которых редко превышает 1%, поэтому данный вид сырья в основном является попутным компонентом добычи или вовсе не извлекается при отработке месторождения.

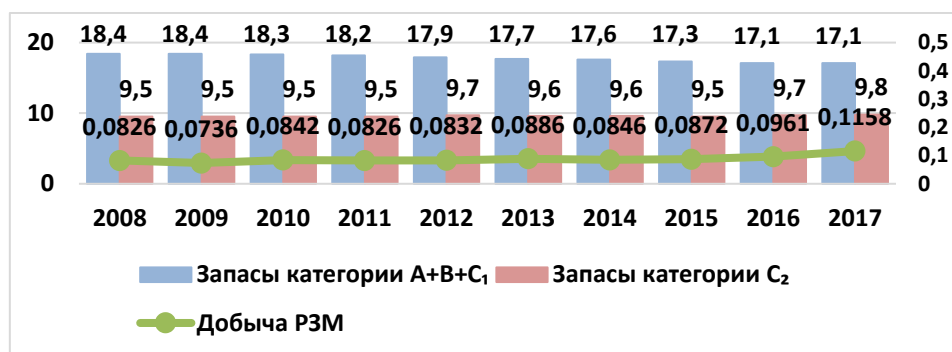


Рис. 2: Динамика запасов и добычи РЗМ в России за период 2008–2017 гг. ( $\Sigma TR_2O_3$ ), млн т. *Источник:* на материалах [16].

Основная часть добычи РЗМ в России (84%) ведётся на крупнейшем в мире предприятии по производству апатитового концентрата АО «Апатит», входящее в холдинговую компанию ОАО «ФосАгро» [17]. Добыча ведётся на шести месторождениях апатит-нефелиновых руд: Юкспорском (I шахтное поле), Апатитовый цирк, Плато Расвумчорр, Ньоркпахкском, Коашвинском и Кукисвумчоррском в Мурманской области. Вторая по уровню добычи РЗМ в России – ЗАО «Северо-Западная фосфорная компания», входящая в группу «Акрон» [18], обеспечивает около 13%. Добыча ведётся на месторождении Олений Ручей в Мурманской области. Поскольку оба холдинга являются вертикально-интегрированными, а основной конечной продукцией являются минеральные удобрения, то из апатитового и нефелинового концентратов извлекают фосфор и частично фтор, содержащиеся в нём стронций и РЗМ не извлекаются. В 2014 году этими холдингами были построены опытные производства для извлечения РЗМ из апатитового концентрата и фосфогипса.

В итоге основное количество запасов и добыча редкоземельных металлов в России заключено в недрах двух субъектов: Мурманской области (запасы – 67%, добыча – 100%) и Республике Саха (Якутия) (запасы – 16,7%). Такая обособленность запасов и добычи обуславливает соответствующие производственные цепочки редкоземельных металлов в Российской Федерации.

В мае 2014 года совместное предприятие Госкорпорации Ростех и группы ИСТ – «ТриАрк Майнинг» – выиграло конкурс на разработку участка Буранный уникального редкоземельного месторождения Томтор, которое смело можно представлять природным концентратом РЗМ. Рудными минералами промышленно ценных элементов являются минералы группы крандаллита, монацита, пирохлора, ксенотима. Оно является уникальным по своему составу и концентрациям двух десятков как традиционных полезных ископаемых (железо, фосфор, титан, ванадий), так и редких элементов (от лантана до высокодефицитных иттрия и скандия). Но визитной карточкой Томтора являются редкие элементы: ниобий, иттрий, скандий и группа лантаноидов. Практически каждый из них присутствует в очень внушительных концентрациях, ранее не известных в мировой геологической практике, благодаря чему именно якутское месторождение, в ряду уникальных ниобий-редкоземельных объектов планеты, заняло первое место в мире. Запасы редких элементов в месторождении Томтор огромны и при нынешнем спросе могут обеспечить потребности России (а при определённых условиях и мира) на сотни лет [19].

По лицензионному соглашению, участок Буранный должен быть введен в эксплуатацию не позднее августа 2023 г. Согласно ТЭО постоянных разведочных кондиций (2018 г.), его разработка будет вестись открытым способом в две очереди. Ожидаемая производительность первой очереди (продолжительность 20 лет) составит 150 тыс. т сухой руды в год, добыча будет вестись в холодное время года (с ноября по май). Добытая руда в герметичных биг-бэгах специальной конструкции будет транспортироваться автотранспортом по зимнику до порта погрузки (Хатанга), откуда судами арктического флота в навигационный период будет перевозиться по Севморпути в терминалы с выходом на железно-

дорожное сообщение и далее по железной дороге – к месту переработки в г. Краснокаменск.

Ввод в эксплуатацию КГМК ожидается в 2024 г. По данным ТЭО постоянных разведочных кондиций (2018 г.), его производительность по переработке руды составит 150 тыс. т в год; товарной продукцией будут оксиды лантана (3,6 тыс. т в год), церия (6,6 тыс. т), празеодима (0,7 тыс. т), неодима (2 тыс. т), коллективный концентрат средне тяжелой группы РЗМ (1,8 тыс. т), феррониобий (4,5 тыс. т) и концентрат скандия (0,6 тыс. т) [20].

### ***Заключение***

Динамичное развитие общества является стимулирующим фактором появления новых знаний, технологий и инноваций, мультипликативный эффект от которых приводит к стремительному росту потребления минерально-сырьевых ресурсов, в том числе редкоземельных металлов. Идентификация всех составляющих элементов этой группы длилась более 150 лет, а промышленное использование этого типа ресурса на данный момент длится только 70 лет. Поэтому очевидно, что их потенциал до сих пор раскрывается по мере развития научно-технологического прогресса и вовлечения в НИОКР. Причём постепенное истощение ранее освоенных и вовлеченных в оборот источников сырья вынуждает осваивать новые типы и ресурсы полезных ископаемых.

Поскольку все РЗМ являются литофильными элементами (т.е. они встречаются вместе с кислородом обычно в оксидных, силикатных или фосфатных комбинациях), то они никогда не встречаются в чистом индивидуальном виде, а значит руды являются комплексными и сложными по составу. В настоящее время типичными минералами, которые образуют рудные объекты для промышленного освоения, являются монацит, бастнезит, ксенотим и ионно-адсорбирующие глины. При этом известно несколько сотен минералов, содержащих РЗМ, однако незначительная их часть имеет экономический и технологический потенциал, например, различные промышленные отходы и хвосты обогащения, глубоководные породы и т.д.

В России основные источники редкоземельных минерально-сырьевых ресурсов состоят из апатит-нефелиновых и лопаритовых руд с бедным суммарным содержанием РЗМ, в результате чего данный вид сырья часто вообще не извлекается при добыче. Поэтому уникальное ниобий-редкоземельное месторождение Томтор может обеспечить потребности в стратегическом сырье для высокотехнологичных отраслей промышленности не только России, но и мира. Однако для этого необходимо построить всю производственную цепочку в пределах страны, стать крупным экспортером продукции с высокой добавленной стоимостью. И будет стратегической ошибкой этого не сделать!

### ***Благодарность***

Исследования выполнялись при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-18-00170).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Volker Zepf. Rare Earth Elements. A New Approach to the Nexus of Supply, Demand and Use: Exemplified along the Use of Neodymium in Permanent Magnets. – Berlin; Heidelberg: Springer, – 2013. – Augsburg University. – 162 p. DOI: 10.1007/978-3-642-35458-8.
2. Greinacher E. History of rare Earth applications, rare Earth market today. In: ACS symposium series. – 1981. – P. 3–17.
3. Our company [Electronic resource] // Treibacher Industrie AG: [Website]. URL: <https://www.treibacher.com/en/company.html> (дата обращения: 05.03.2018).
4. The History of Color Television [Electronic resource] // ThoughtCo: [Website]. URL: <https://www.thoughtco.com/color-television-history-4070934> (дата обращения: 15.04.2021).
5. Binnemans, K., Jones, P.T. Rare Earths and the Balance Problem // Journal Sustainable Metallurgy. 2015. – №1. – P. 29–38. <https://doi.org/10.1007/s40831-014-0005-1>.
6. Юшина Т. И., Петров И. М., Гришаев С. И., Черный С. А. Мировой рынок и технологии переработки редкоземельных металлов современное состояние и перспективы // Обогащение руд. – 2020. – №6. – С. 47–53. DOI: 10.17580/or.2020.06.08.
7. About [Electronic resource] // MP Materials: [Website]. URL: <https://mpmaterials.com/about/#history> (дата обращения: 15.02.2021).
8. Jost Wübbecke. Rare earth elements in China: Policies and narratives of reinventing an industry // Resources Policy. – 2013. – Vol. 38, Issue 3 – P. 384-394. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142071300041X?via%3Dihub> (дата обращения: 22.04.2017).
9. Rare earths: Ganzhou RE expects mining resumptions // Roskill: [Website]. URL: <https://roskill.com/news/rare-earths-ganzhou-re-expects-mining-resumptions> (дата обращения: 22.11.2020).
10. Lynas is an integrated source of rare earths from mine to customer [Electronic resource] // Lynas Corporation LTD. URL: <https://www.lynascorp.com/Pages/Our-Company.aspx> (дата обращения: 05.03.2018).
11. About CBMM [Electronic resource] // CBMM: [Website]. URL: <https://www.cbmm.com/en/Nossa-Companhia/Sobre-a-CBMM> (дата обращения: 02.02.2018).
12. Campos M.F. De, Rodrigues D.L, Castro J.A. De. Rare-earth magnets: a promising Brazilian industry [Electronic resource] // Conference: SBPMAT 2014. September 2014. DOI: 10.13140/2.1.4575.1041.
13. About Us [Electronic resource] // IREL (India) Limited: [Website]. URL: [http://www.irel.co.in/content/1494\\_3\\_AboutUs.aspx](http://www.irel.co.in/content/1494_3_AboutUs.aspx) (дата обращения: 02.12.2017).
14. Яценко В.А., Самсонов Н.Ю., Крюков Я.В. Опционный подход к экономической оценке проектов разработки редкоземельных месторождений. - DOI: 10.25205/2542-0429-2018-18-4-69-84 // Мир экономики и управления. - 2018. - Т. 18, № 4. - С. 69-84.
15. Kato, Y., Fujinaga, K., Nakamura, K. et al. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements // Nature Geosci. – №4. – 2011. – P. 535–539. <https://doi.org/10.1038/ngeo1185>.
16. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации [Электронный ресурс] // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации: [Сайт]. URL: [http://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye\\_doklady/o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resursov\\_rossiyskoj\\_federatsii](http://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoj_federatsii) (дата обращения: (дата обращения: 15.06.2018).
17. Группа «ФосАгро» [Электронный ресурс] // Группа компаний ФосАгро: [Сайт]. URL: <https://www.phosagro.ru/about/holding/item49.php> (дата обращения: 08.09.2017).
18. СЗФК [Электронный ресурс] // АО «Северо-Западная Фосфорная Компания»: [Сайт]. URL: <https://www.szfk.ru> (дата обращения: 11.09.2017).



19. Толстов А.В., Коноплев А.Д., Кузьмин В.И. Особенности формирования уникального редкометалльного месторождения Томтор и оценка перспектив его освоения // Разведка и охрана недр. – 2011. – №6. – С. 20 – 26.

20. Добыча [Электронный ресурс] // Компания «ТриАрк Майнинг»: [Сайт]. URL: <https://threearc.ru/dobycha-rudy.php> (дата обращения: 01.05.2021).

© В. А. Яценко, 2021