

УДК 553.493.8:553.078

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ИСТОРИЧЕСКОЙ МЕТАЛЛОГЕНИИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2022 г. А. В. Ткачев^а *, Д. В. Рундквист^а, Н. А. Вишневская^а

^аГосударственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, ул. Моховая, 11, стр. 11, Москва, 125009 Россия

*e-mail: a.tkachev@sgm.ru

Поступила в редакцию 06.07.2021 г.

После доработки 13.10.2021 г.

Принята к публикации 24.01.2022 г.

Проанализировано распределение месторождений и заключенных в них ресурсов редкоземельных элементов (РЗЭ) в геологической истории. Основой для анализа стали данные по 103 месторождениям со всего мира с ресурсной оценкой от 10^5 тонн суммы оксидов РЗЭ (лантаноидов и иттрия). Вариативность формирования значительных концентраций РЗЭ в геологическом времени продемонстрирована на сопоставлении суперконтинентальных циклов по количеству ресурсов в рудах разных типов и возрастов. В кенорском цикле выявлено только одно месторождение, в котором ресурсы РЗЭ количественно превысили указанный лимит — это модифицированные палеороссыпы с изначально детритной U-REE минерализацией. Россыпной тип также представлен в амазийском цикле, но месторождениями с иной специализацией. Карбонатитовый, гипергенный в карбонатах, сиенитовый и щелочногранитный типы представлены месторождениями во всех остальных суперконтинентальных циклах. Значительные месторождения фойдного типа формировались в колумбийском, родинийском и пангейском циклах, субщелочногранитного — в колумбийском и родинийском циклах, а залежи ионно-адсорбционного типа известны только в амазийском цикле. На оси геологического времени месторождения всех типов распределены весьма неравномерно. При этом максимальное количество ресурсов оценено в месторождениях родинийского цикла. Остальные циклы, не считая крайне малопродуктивного кенорского, уступают по выявленным ресурсам родинийскому циклу в 2–2.5 раза. Проанализированы также особенности распределения в месторождениях разных типов и возрастов тех легких и тяжелых РЗЭ, которые имеют наиболее высокие цены на мировом рынке. Определены месторождения с ярко выраженной специализацией на отдельных группах таких особо ценных РЗЭ. Они присутствуют в списках месторождений всех суперконтинентальных циклов, кроме кенорского.

Ключевые слова: месторождение редкоземельных элементов, металлогения редкоземельных элементов, щелочной магматический комплекс, кора выветривания, россыпь, “ионные глины”, суперконтинентальный цикл

DOI: 10.31857/S0016777022030066

ВВЕДЕНИЕ

Редкоземельные элементы (РЗЭ), именуемые также редкоземельными металлами, а зачастую и редкими землями (что все же корректнее адресовать оксидам РЗЭ), последнее время все чаще называют витаминами современной промышленности (Balaram, 2019 и ссылки там). Это абсолютно правомерная метафора, так как трудно, если вообще возможно, найти какое-либо высокотехнологичное изделие последнего десятилетия, используемое в транспорте, энергетике, медицине, химической промышленности, аэрокосмической и оборонной технике, оптических, лазерных и телекоммуникационных системах, бытовых гаджетах и т.п., в котором бы отсутствовали детали, содержащие РЗЭ. Массовая доля РЗЭ в этих изде-

лиях, как и в случае витаминов в человеческом организме, обычно очень мала, однако их присутствие принципиально важно для полноценного функционирования прибора, устройства, системы и т.п. Поэтому не удивительно, что бурное развитие высокотехнологичных производств в XXI в. вызвало бум потребления РЗЭ, которое преимущественно обеспечивается пропорциональным увеличением добычи редкоземельных руд. За последние двадцать лет ежегодный объем РЗЭ, целенаправленно извлеченных из недр, увеличился почти в три раза и приблизился, в пересчете на их оксиды (РЗО), к 240 тыс. т (Hedgick, 2001; Gambogi, 2021). В полной взаимосвязи с этой ситуацией горнодобывающие и геологоразведочные компании во всем мире отреагировали соразмерным всплеском интереса к месторождениям данного

вида минерального сырья. Были введены в эксплуатацию новые и реанимированы некоторые законсервированные рудники, реализовано несколько десятков проектов по оценке или переоценке как ранее известных месторождений, так и не затронутых прежде значительными объемами геологоразведочных работ рудопроявлений с переводом некоторых из них в ранг полноценных месторождений.

Этот бум в горнодобывающей и геологоразведочной отраслях экономики, в свою очередь, мощно стимулировал рост академических и прикладных научных исследований геологии рудо-вещающих комплексов, минералогии, петрологии, геохимии и геохронологии месторождений РЗЭ, технологий переработки их руд вплоть до извлечения индивидуальных РЗЭ и доведения конечного продукта до максимальной чистоты. Помимо прочего, это нашло отражение во все нарастающем вале публикаций по упомянутым темам. Даже объемный список подобных работ, присутствующий в данной статье, представляет лишь малую долю от их общего количества. Помимо исследований по отдельным месторождениям, стали нередкими работы, обобщающие информацию как по целым типам месторождений РЗЭ (Лапин и др., 2011; Borst et al., 2020; Chakhmouradian, Zaitsev, 2012; Cocker, 2014; Dostal, 2017; Elsner, 2010; Verplanck et al., 2016; Wang et al., 2020; и др.), так и по металлогении РЗЭ крупных регионов, включая оценку их ресурсного потенциала (Архангельская и др., 2006; Vatapola et al., 2020; Goodenough et al., 2016; Harmer, Nex, 2016; Hoatson et al., 2011; Singh, 2020; Sørensen et al., 2018; Takehara et al., 2016; Tran et al., 2016; Xie et al., 2016; и др.). Растет также количество глобальных обобщений аналогичной направленности (Balaram, 2019; Dushyantha et al., 2020; Eggert et al., 2016; Goodenough et al., 2018; Linnen et al., 2014; Paulick, Machacek, 2017; Simandl, 2014; Wall, 2014; Weng et al., 2015; Zhou et al., 2017; и др.). Притом, что в этих обзорах анализируется широкий круг вопросов, такой достаточно важный аспект, как вариативность исторической металлогении РЗЭ, в них практически не рассматривается. Только в одной статье эта тема затронута, но на небольшой выборке из 15 объектов, которую трудно считать представительной (Smith et al., 2016). Наше недавнее краткое сообщение, посвященное данному вопросу, основывалось на сведениях о 82 месторождениях и было сосредоточено на сравнении разнообразия их типов в разных суперконтинентальных циклах (Ткачев и др., 2018). После этой публикации авторы существенно нарастили используемую для анализа базу данных, а также собрали уточненную информацию по возрастам и типовой принадлежности ряда месторождений, количеству и качественным характеристикам руд в них. Анализ обновленного массива информации позволяет показать еще бо-

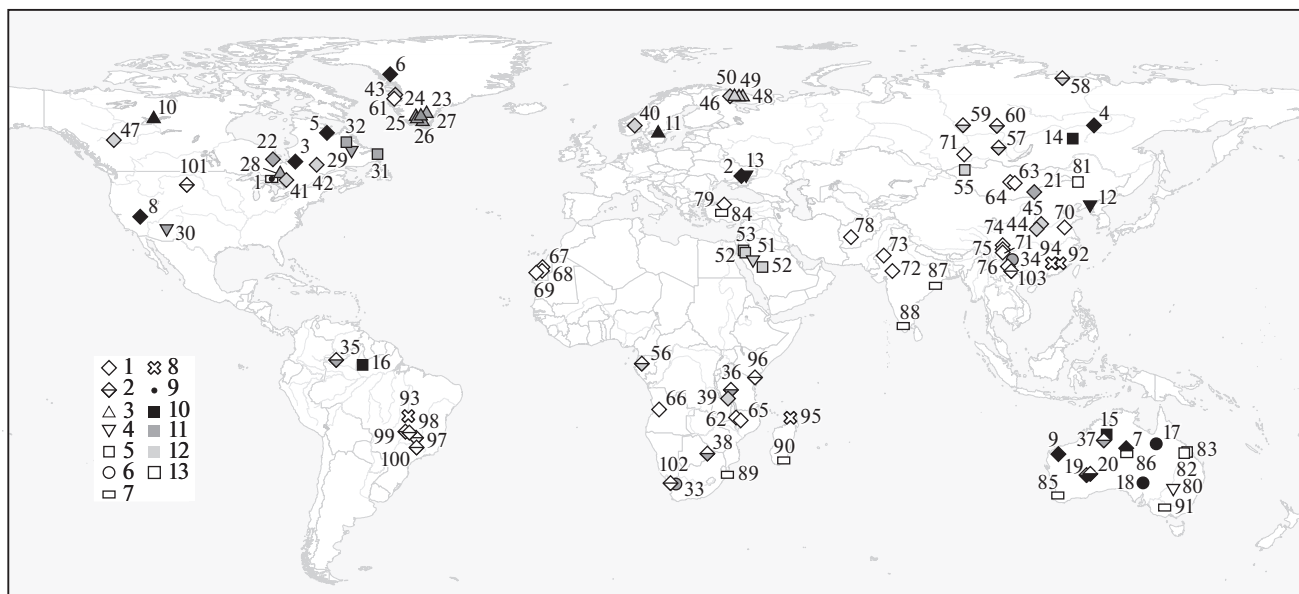
лее объективную картину распределения на геохронологической оси как выявленных ресурсов РЗЭ, так и типов месторождений, которые эти ресурсы аккумулировали. Также появилась возможность провести сравнительный анализ количественных и качественных характеристик руд для месторождений из разных геологических эпох и типов.

ДАнные ДЛя АНАЛИЗА

Согласно рекомендациям Международного союза теоретической и прикладной химии (IUPAC), к редкоземельным металлам отнесены 17 химических элементов: 15 лантаноидов (Ce, La, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu), иттрий (Y) и скандий (Connelly et al., 2005). В практике геологоразведочных и горнодобывающих компаний принято не включать скандий в список РЗЭ, т.к. в большинстве случаев он образует промышленно интересные концентрации в месторождениях совсем иных типов, чем остальные РЗЭ (Быховский и др., 2007; Wang et al., 2021). Кроме того, в этой же практике отсутствует лантаноид прометий. В природе он встречается только в следовых количествах среди продуктов спонтанного деления урана, и у него нет стабильных изотопов: самый долгоживущий из них ^{145}Pm имеет период полураспада 17.7 лет (Audi et al., 2003). Поэтому предметом рассмотрения статьи являются месторождения остальных 14 лантаноидов и иттрия.

Как в научных публикациях, так и в геологоразведочных отчетах эти элементы обычно делят на две группы: легкие и тяжелые РЗЭ. В нормативных документах состав групп не детерминирован, поэтому у разных авторов содержание этих понятий может отличаться. В данной статье принят наиболее распространенный в публикациях вариант такого деления: к легким РЗЭ, которые еще называют цериевыми, отнесены лантаноиды от лантана до самария (Ln_{Ce}), а к тяжелым РЗЭ, также называемым иттриевыми, отнесены остальные лантаноиды и иттрий ($\text{Ln}_{\text{Y}} + \text{Y}$). Некоторыми специалистами выделяется группа средних (среднетяжелых) РЗЭ, которая также не имеет единообразного определения. В нашем исследовании этот термин не используется ввиду отсутствия необходимости.

Фактологической основой для анализа послужили сведения из базы данных крупных и суперкрупных месторождений мира, созданной и постоянно пополняемой и обновляемой в ГГМ РАН (Рундквист и др., 2006). Имеющаяся в ней информация почти в полном объеме общедоступна через интернет в ВЕБ-ГИС приложении “Крупнейшие месторождения мира” на геопортале “Металлогения” (Ткачев и др., 2019.).



Фиг. 1. Размещение месторождений РЗЭ, попавших в выборку для анализа. Условные обозначения. 1–8 – типы месторождений: 1 – карбонатитовый, 2 – гипергенный в карбонатитах, 3 – фойдитный, 4 – сиенитовый, 5 – щелочногранитный, 6 – субщелочногранитный, 7 – россыпной, 8 – ионно-адсорбционный; 9–13 – суперконтинентальные циклы: 9 – кенорский, 10 – колумбийский, 11 – родинийский, 12 – пангейский, 13 – амазийский. Нумерация месторождений идентична их нумерации в табл. 2.

В выборку объектов для анализа в предлагаемом исследовании включены месторождения, ресурсная оценка которых (включая прошлую добычу, если она была) составляет не менее 10^5 тонн РЗО. Кроме того, для всех типов месторождений, исключая россыпи и ионные глины, была установлена нижняя граница средних содержаний РЗО: 0.20% при рядовых содержаниях Ln_{γ} и 0.15% при их повышенных содержаниях. Общее число таких объектов в анализируемой выборке составило 103 (фиг. 1).

Для некоторых месторождений можно найти разные количественные оценки, которые могут меняться как от увеличения со временем объемов работ, проведенных на объекте, так и от варьирования принятых при расчетах бортовых содержаний РЗО. В этом исследовании использовались те оценки ресурсов, которые отражают самую продвинутую на настоящий момент стадию изучения конкретного объекта и сделаны с использованием наиболее рационального, по мнению соответствующей геологоразведочной или горнодобывающей компании, бортового содержания полезного компонента. Такие оценки обычно фигурируют в качестве базовых в технических докладах и презентациях этих компаний.

ТИПЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В выборку вошли месторождения, большинство из которых генетически связаны с магмати-

ческими комплексами широкого спектра кремнекислотности, но всегда с высокой или повышенной щелочностью. Подобные рудные залежи возникают при магматической кристаллизации и/или циркуляции постмагматических гидротерм (табл. 1). При этом месторождения в карбонатитовых комплексах были разделены, как общепринято, на два типа: карбонатитовый и гипергенный в карбонатитах. В последний тип включены объекты, содержащие не менее трети оцененных ресурсов в рудах, образованных при интенсивном выветривании материнских карбонатитовых комплексов, в подавляющем большинстве случаев латеритного типа. Этот гипергенный процесс приводит к тотальному разложению гипогенной минерализации в приповерхностных горизонтах и формированию на более низких уровнях коры выветривания новообразованных руд, имеющих иные перечни и состав минералов, структурно-текстурные особенности, соотношения полезных компонентов, более высокие их средние содержания. Реликты гипогенных рудных минералов в них также присутствуют в переменных количествах, в целом обратно пропорциональных интенсивности гипергенных изменений вмещающего минерального субстрата. Поскольку источником вещества для новообразованных вторичных руд является эндогенная минерализация, а возраст гипергенного рудогенеза крайне редко поддается однозначному определению, то при рассмотрении геохронологических аспектов распределения таких объектов

авторы использовали возраст эндогенных материнских комплексов.

Имеется также два типа месторождений, возникновение которых никак не связано с наличием изначально повышенных концентраций РЗЭ в первичном субстрате: это месторождения в глинах с высокой способностью к ионной адсорбции таких элементов и россыпи различного происхождения, в основном прибрежно-морские (табл. 1).

В большинстве случаев РЗЭ входят в состав комплексных руд с Р, Nb, Zr, Fe, U, F и некоторыми другими элементами (в разных сочетаниях), не всегда являясь компонентами, представляющими основной экономический интерес. Только ионные глины и часть карбонатитов имеют собственными редкоземельными залежами с крупными запасами. Тем не менее, для извлечения РЗЭ интерес представляют как руды, специализированные только на них, так и комплексные руды. Понятно, что большая комплексность обычно дополнительно усложняет технологические процессы из-за необходимости разделения извлекаемых элементов и, соответственно, повышает себестоимость переработки минерального сырья. Последняя может не получить соответствующую компенсацию через реализацию всех конечных продуктов, например, из-за неблагоприятной конъюнктуры для некоторых из них. Вопрос экстракции любого компонента таких руд решается на основе экономических расчетов. Важным фактором является и то, какие именно минеральные формы фиксации РЗЭ имеют место в рудах, т.к. содержания РЗЭ и попутных им полезных компонентов в разных минералах могут многократно отличаться, что сильно сказывается на рентабельности всего процесса получения редкоземельной продукции. Однако устойчивый рост потребления РЗЭ и постоянное усовершенствование технологий переработки минерального сырья позволяет авторам многих исследований, анализирующих тенденции развития и использования минерально-сырьевой базы в глобальном масштабе, рассматривать месторождения даже с самыми сложными рудами в качестве перспективных источников РЗЭ в обозримом будущем (Balaram, 2019; Dushyantha et al., 2020; Goodepough et al., 2018; Paulick, Machacek, 2017; Weng et al., 2015; Zhou et al., 2017). Поэтому в нашем металлогеническом анализе месторождения с разной степенью комплексности и с разными минеральными формами концентрирования РЗЭ участвуют на равных основаниях. Данные о комплексности руд отдельных месторождений и главных минералах-носителях РЗЭ в их рудах, наряду с геохронологическими данными и ссылками на источники геологической и геохронологической информации, приведены в табл. 2.

В обзорах по сырьевой базе мира можно встретить краткие описания и других типов минерали-

зации как потенциальных источников получения РЗЭ: фосфоритов, бокситов, черных сланцев, глубоководных металлоносных конкреций и илов (Balaram, 2019 и ссылки там). Среднее содержание суммы РЗЭ в таких объектах редко достигает даже 0.1%, что при современном и прогнозируемом уровне цен на РЗЭ является негативным фактором в оценке перспектив вовлечения их в эксплуатацию в обозримом будущем. Кроме того, если рассматривать глубоководные осадки в практическом ракурсе, то даже для давно изучаемых металлоносных конкреций до сих пор нет одновременно и рентабельных, и при этом достаточно экологичных технологий добычи минерального сырья. Поэтому ни один из объектов, относящихся к этому перечню нетрадиционных источников РЗЭ, до сих пор не только не эксплуатировался для извлечения РЗЭ, но даже серьезно не оценивался на предмет экономической целесообразности такого извлечения. Таким образом, реальное значение подобных объектов в металлогении РЗЭ еще не вполне понятно, и в нашем анализе они не участвовали.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РЗЭ В ПРОСТРАНСТВЕ И ВРЕМЕНИ

Все месторождения выборки в соответствии с их возрастом (табл. 2) были распределены на шкале геологического времени, сегментированной на отрезки по 50 млн лет. Для каждого такого отрезка данные о накопленных ресурсах РЗЭ (в пересчете на РЗЭ) в отдельных месторождениях (фиг. 2) интегрировались с учетом их принадлежности к разным металлогеническим типам (фиг. 3). Вариации в металлогении РЗЭ с течением геологического времени анализировались через сравнения в этом аспекте суперконтинентальных циклов, геохронологические границы которых были обоснованы авторами ранее (Ткачев, Рундквист, 2016). Сводные количественные данные по каждому циклу собраны в табл. 3.

Кенорский цикл (>2.25 млрд лет). Если взять общую выборку месторождений, полученную нами для всех суперконтинентальных циклов, то окажется, что карбонатитовые и силикатные щелочные магматические комплексы являются материнскими (если не исключать и их коры выветривания) для месторождений, содержащих 98.4% всех ресурсов РЗЭ в выборке (табл. 3). Подобные по своей природе магматические комплексы известны в геологических формациях, начиная с архея (Downes et al., 2012), т.е. с кенорского цикла. Однако только в одном из массивов этого периода – интрузии нефелиновых сиенитов Сахарйок (2.61 млрд лет, Балтийский щит) – выявлены залежи с признаками промышленного месторождения Zr и РЗЭ (Зозуля и др., 2015). По содержанию и количеству РЗЭ циркон-бритолитовые руды

Таблица 1. Типы месторождений редкоземельных элементов (РЗЭ) в анализируемой выборке

Типы месторождений	Материнские комплексы	Локализация рудных тел	Возможные главные концентраты РЗЭ в рудах ¹	Возможные попутные компоненты на месторождениях ²	Крупнейшие месторождения (по оцененным ресурсам РЗО) ³
1	2	3	4	5	6
Карбонатитовый (К)	Карбонатиты ± нефелиновые сиениты ± сиениты ± ультрамафиты	Минерализация в карбонатитах и/или прилегающих к ним силикатных породах полифазных комплексов, а также в фенитах и дайково-жильных зонах вблизи таких комплексов; тела могут быть затронуты приповерхностным окислением, гидратацией и на-чальной латеритизацией, но без массового перераспределения рудного вещества; все месторождения перспективны для наращивания ресурсов на глубину	Бастнезит, монацит, синхизит, паризит, апатит, карбоцернаит, пирохлор, бурбанкит, анкилит, ортит, перовскит, ханнешит, хуанхит, какарсукиит	Nb, P, Fe, Ba, F, U, Ti, Zr	<i>Баянь-Обо</i> , Сент-Онорэ, Намсе, Ашрам, Лонгонжу, Селигдар, <i>Маунтин-Пасс</i> , Карасут
Гипергенный в карбонатитах (ГК)	Зональные коры выветривания по минерализованному карбонатитовым комплексам	Стратоидные тела, состоящие из находящихся в разных количествах рудных минералов, гипогенных рудных минералов, перемещенных продуктов на месте их гипергенного изменения и новообразованных минералов, возникших за счет элементов из продуктов разложения пород более верхних горизонтов	Монацит, флоренсит ⁴ , бастнезит, паризит, синхизит, рабдофан, пирохлор, церианит, апатит, анкилит, черчит	Nb, P, Fe, Mn, Ta, Ba, Ti, F, Zr, Sc	Араша, Чуктукон, Каталан I, Мрима-Хилл, Нгуалла, Томтор ⁵ , <i>Маунт-Уэлд</i>
Фойдный (Ф)	Фельдшпатоидные (фойдные) сиениты ± сиениты ± щелочные граниты	Минерализованные слои фойдных пород (нефелиновых и/или содалитовых), повторяющиеся в разрезах расслоенных комплексов	Эвдиалит ⁶ , стенструпин, лопарит, апатит, мозандрит, пирохлор, бастнезит, бритолит, циркон	Zr, U, Nb, Ta, Zn, Ti	Танбрез, <i>Хибини</i> , <i>Ловозерское</i> , Нечалачо
Сиенитовый (С)	Сиениты (или трахитпорфиры)	Минерализованные тела сиенитовых (трахитовых) пород или их части, иногда – стратиформные зоны в расслоенных интрузивах бесфойдных сиенитов	Бритолит, эвдиалит, монацит, ортит, бастнезит, циркон	Zr, Nb, Ta, Be	Чонджу, Ту-Том, Тунги

Таблица 1. Продолжение

Типы месторождений	Магеринские комплексы	Локализация рудных тел	Возможные главные концентраторы РЗЭ в рудах ¹	Возможные попутные компоненты на месторождениях ²	Крупнейшие месторождения (по оцененным ресурсам РЗЭ) ³
1	2	3	4	5	6
Щелочногранитный (ЩГ)	Щелочные граниты (±сиениты ± субщелочные граниты ± гранодиориты) или их субвулканические и вулканические аналоги, включая туфы	Интенсивно минерализованные метасоматические и/или жильные (в т.ч. пегматитовые) рудные тела в интрузиях щелочных гранитов с более равномерной бедной рудной минерализацией; тотально минерализованные субвулканические штоки или лавово-туфовые слои	Циркон, гагаринит, ксенотим, бастнезит, пирохлор, флюорит, фергусонит, самарскит, монацит, синхизит, ортит, хинганит, эвдиолит, эшинит, галлолит, чевкинит	Zr, Nb, Ta, F, Sn, Be	Стрэндж-Лэйк, Гурая, Катугинское, Баэрчжэ
Субщелочногранитный (СГ)	Субщелочные гранитные массивы	Прожилково-вкрапленная минерализация (надинтрузивные брекчии, скарны, метасоматические ореолы) или массивные кварцевые жилы в экзоконтактных зонах крупных гранитных интрузий; типична ассоциация с медной сульфидной минерализацией и обычно высокая радиоактивность руд	Ортит, бастнезит, монацит, флоренсит, стиллуэллит	Cu, Au, Fe, U, Th, Ag	Олимпик-Дэм, Шин-Куен, Мэри-Кэглин, <i>Стенкамискрай</i>
Россыпной (Р)	Терригенные отложения прибрежно-морского, аллювиального или пролювиального происхождения, иногда – эндотенно модифицированные	Горизонты в песках, песчаниках или метаконгломератах, обогащенные детритными минералами РЗЭ, имеющими мелко-псаммитовую или пелитовую размерность	Монацит, ортит, ксенотим, чевкинит, сфен, уранинит, коффинит, ураногорит	Ti, Zr, Th, U	ВИМ-150, <i>Чатранур, Чавара</i>
Ионно-адсорбционный или “ионные глины” (И)	Молодые латеритные коры кремнекислых пород вулканоплутонических комплексов	Стратоидные тела глинистых пород на средних горизонтах зональных латеритных кор ⁷	Каолинит, галлуазит, смектит, иллит		Серра-Верде, Танталус, <i>Лоннань</i>

Примечание. ¹ В порядке частоты встречаемости на месторождениях выборки; ² здесь и далее: Ва – барит, F – флюорит (КЭ, КГ, ЩГ) или криолит (ЩГ); ³ курсивом выделены месторождения, где РЗЭ извлекаются/извлекались из руд в промышленных масштабах; ⁴ здесь и далее имеются в виду минералы сложного состава из группы плумботуммита, содержащие значительную долю флоренцитового компонента вплоть до его полного преобладания; ⁵ только богатые руды участков Буранный, Северный и Южный; ⁶ здесь и далее имеются в виду минералы группы эвдиолита без указания точного состава, который на некоторых месторождениях даже не установлен из-за высокой дисперсности их зерен в руде; ⁷ при переработке таких руд извлекаются только РЗЭ, входящие в ионные комплексы, которые адсорбированы в глинистых минералах; те же самые горизонты содержат варьующие количества минералов с РЗЭ, входящих в их кристаллическую структуру – они не извлекаются при переработке.

Таблица 2. Месторождения РЗЭ, вошедшие в выборку для анализа, полезные компоненты в их рудах, главные минералы-концентраты редких земель, геохронологические данные и основные использованные источники информации

№ ¹ пп	Месторождение	Тип ²	Компоненты в руде ³	Главные концентраты РЗЭ в руде	Возраст ⁴ (млн лет), минерал ⁵ , порода ⁶	Ссылки	
						геохронология	геология
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Эллиот-Лэйк	Р	U, РЗЭ	Монацит, ортит, уранинит, коффинит, ураногорит	2450 ± 25, z, bs	Krogh et al., 1984	Workman et al., 2013
2	Новополтавское	К	Р, РЗЭ, Zr, Nb	Монацит, апатит	2074 ± 6, z, cb	Rukhlov, Bell, 2010	Гурский и др., 2005
3	Монтвизель	К	РЗЭ, Nb, Р	Бурбанкит, карбоцернаит, монацит, кордилит	1894 ± 4, z, ns	David et al., 2006	Nadeau et al., 2015
4	Селиндар	К	Р, РЗЭ	Апатит	1880 ± 1, z, cb	Prokopyev et al., 2017	Prokopyev et al., 2017
5	Ашрам	К	РЗЭ	Монацит, бастнезит	1870 ± 4, z, rd ⁷	Machado et al., 1997	Mitchell, Smith, 2017
6	Каррат	К	РЗЭ	Бастнезит, монацит, ортит	1859 ± 15, mz, o	Mott et al., 2013	Mott et al., 2013
7	Ноланс-Бор	К	РЗЭ, Р, U	Апатит, ортит	1525 ± 18, al, o	Huston et al., 2016	Huston et al., 2016
8	Маунтин-Пасс	К	РЗЭ	Бастнезит	1371 ± 10, mz, o	Poletti et al., 2016	Poletti et al., 2016
9	Янгибана	К	РЗЭ	Монацит	1373 ± 8, mz, o	Slezak, Spandler, 2019	Hastings..., 2017
10	Нечалачо	Ф	РЗЭ, Zr, Nb, Ta	Синхизит, ортит, фергусонит, бастнезит, монацит, циркон	2176 ± 3, z, ns	Möller, Williams-Jones, 2016	Möller, Williams-Jones, 2016
11	Норра-Черр	Ф	РЗЭ, Zr	Эвдиалит	1488 ± 8, z, fn	Sjöqvist et al., 2020	Sjöqvist et al., 2020
12	Чонджу	С	РЗЭ	Бритолит	1868 ± 8, z, s	Kim et al., 2016	—
13	Азовское	С	РЗЭ, Zr	Бритолит, ортит, бастнезит	1805 ± 7, z, s	Шеремет и др., 2012	Шеремет и др., 2012
14	Катугинское	ЩГ	Zr, РЗЭ, F, Nb, Ta	Гагаринит, флюорит, пирохлор	2055 ± 7, z, o	Gladkochub et al., 2017	Gladkochub et al., 2017
15	Брокмэн	ЩГ	Zr, Nb, РЗЭ, Ta	Циркон, самарскит, бастнезит	1870 ± 4, z, tp	Taylor et al., 1995	Ramsden et al., 1993
16	Питинга	ЩГ	Sn, Nb, Ta, РЗЭ, Zr, F	Ксенотим, гагаринит	1818 ± 2, z, ag	Costi et al., 2000	Bastos Neto et al., 2009
17	Мэри-Кэглин	СГ	U, РЗЭ	Ортит, стиллуэлит	1531 ± 7, tt, o	Spandler et al., 2016	Oliver et al., 1999
18	Олимпик-Дэм	СГ	Cu, Au, U, Ag, РЗЭ, Fe	Бастнезит, флоренсит	1593 ± 0.3, z, sg	Courtney-Davies et al., 2020	Ehrig et al., 2012
19	Маунт-Уэлд	ГК	РЗЭ	Монацит, флоренсит, черчит	2025 ± 10, mt, cb	Graham et al., 2004	Jaireth et al., 2014
20	Краун	ГК	Nb, Ta, РЗЭ, Р	Монацит, пирохлор, рабдофан	2025 ± 10, mt, cb	Graham et al., 2004	Jaireth et al., 2014
21	Баянь-Обо	К	РЗЭ, Fe, Nb, F, Sc	Монацит, бастнезит	1301 ± 12, z, cb	Zhang et al., 2017	Deng et al., 2017
22	Клэй-Хауэллс	К	РЗЭ, Fe, Nb,	Монацит, бритолит	1056 ± 4, mz, o	Richards, 2011	Daigle, 2011

Таблица 2. Продолжение

№ ¹ пп	Месторождение	Тип ²	Компоненты в руде ³	Главные концентраторы РЗЭ в руде	Возраст ⁴ (млн лет), минерал ⁵ , порода ⁶	Ссылки	
						геохронология	геология
23	Моцфельд-Ариэс	Ф	РЗЭ, Nb, Ta, Zr	Пирохлор, бастнезит, монацит, циркон	1273 ± 6, z, ns	McCreath et al., 2012	Paulick et al., 2015
24	Кванефельд	Ф	РЗЭ, U, Zr	Стенструпин	1160 ± 5, bd, as	Krumrei et al., 2006	Paulick et al., 2015
25	Соренсен	Ф	РЗЭ, U, Zr	Стенструпин	1160 ± 5, bd, as	Krumrei et al., 2006	Paulick et al., 2015
26	Танбрез	Ф	Zr, РЗЭ, Nb, Ta	Эвдиалит	1160 ± 5, bd, as	Krumrei et al., 2006	Schönwandt et al., 2016
27	Зона 3	Ф	РЗЭ, U, Zr	Стенструпин	1160 ± 5, bd, as	Krumrei et al., 2006	Paulick et al., 2015
28	Кипава-Лэйк	Ф	РЗЭ, Zr	Эвдиалит, мозандрит, бритолит	1033 ± 3, z, s	Van Breemen, Currie, 2004	Van Breemen, Currie, 2004
29	Ту-Том	С	РЗЭ, Nb, Be	Монацит, ортит	1337 ± 10, z, ag	Gandhi et al., 1988	Daigle, 2012
30	Пахарига-Маунтин	С	РЗЭ, Zr	Эвдиалит	1175 ± 15, k, s	Bauer, Pollock, 1993	Berger, 2018
31	Фокстрот	ЩГ	РЗЭ, Zr	Ортит, фергусонит, чевкинит	1300 ± 3, z, рп	Haley, 2013	Miller, 2015
32	Стрэндж-Лэйк	ЩГ	Zr, РЗЭ, Nb, Be	Гадолитинит, хинганит, ортит, геренит	1240 ± 2, z, ag	Miller et al., 1997	Gysi et al., 2016
33	Стенкампекрал	СГ	РЗЭ, Th, Cu	Монацит	1046 ± 8, mz, o	Knoper, 2010	Basson et al., 2016
34	Шин-Куен	СГ	Cu, Au, Fe, РЗЭ	Ортит	882 ± 3, tt, o	Ngo et al, 2020	Ngo et al, 2020
35	Сейс-Лагос	ГК	Nb, РЗЭ, Fe, Mn	Церианит, флоренсит, пирохлор	1328 ± 58, z, cb	Rossoni et al., 2017	Giovannini et al., 2017
36	Нгвалла	ГК	РЗЭ, Ва	Бастнезит, синхизит	1041 ± 40, bi, cb	Cahen et al., 1984	Witt et al., 2019
37	Камминс-Рэндж	КЛ	РЗЭ, Р	Монацит	1002 ± 13, z, cb	Downes et al., 2016	Hoatson et al., 2011
38	Гленовер	КЛ	РЗЭ, Р, Nb, Sc	Монацит, апатит, синхизит, эшинит	1000 ± 200, mz, cb	Verwoerd, 1967	Geo-Consult International, 2012
39	Нкомба-Хилл	К	РЗЭ, Р	Монацит	679 ± 25, ph, cb	Cahen et al., 1984	Harner, Nex, 2016
40	Фен	К	РЗЭ	Синхизит, паризит, бастнезит, монацит	583 ± 15, ph, lm	Meert et al., 1998	Marien et al., 2018
41	Лавернь	К	РЗЭ	Синхизит	577 ± 1, z, ns	Kamo et al., 1995	Daigle, 2012
42	Сент-Онорэ	К	РЗЭ, Nb, Р	Бастнезит, синхизит, паризит, монацит	582 ± 2, bd, cb	Néron et al., 2018	Néron et al., 2018
43	Сарфарток	К	РЗЭ	Бастнезит, монацит	565 ± 5, ph, cb	Secher et al., 2009	Druecker, Simpson, 2012

Таблица 2. Продолжение

№ ¹ пп	Месторождение	Тип ²	Компоненты в руде ³	Главные концентраторы РЗЭ в руде	Возраст ⁴ (млн лет), минерал ⁵ , порода ⁶	Ссылки	
						геохронология	геология
44	Мяоя	К	РЗЭ, Nb	Монацит, бастнезит, синхизит	428 ± 3, z, cb	Su et al., 2019	Su et al., 2019
45	Тайпинчжэнь	К	РЗЭ	Бастнезит	421 ± 7, bs, o	Zhang et al., 2019	Zhang et al., 2019
46	Африканда	К	Ti, РЗЭ, Fe, Nb	Перовскит	379 ± 6, zl, cb	Wu et al., 2010	Афанасьев, 2011
47	Уичида	К	РЗЭ	Бастнезит, паризит, монацит	316 ± 36, wt, cb	Dalsin, 2013	Trofanenko et al., 2016
48	Ловозерское (РЗЭ-Nb-Ta)	Ф	РЗЭ, Ta, Nb, Ti	Лопарит	381 ± 5, tt, ns	Родионов и др., 2018	Kalashnikov et al., 2016
49	Ловозерское (РЗЭ-Zr)	Ф	РЗЭ, Zr, Nb, Ta	Эвдиалит	381 ± 5, tt, ns	Родионов и др., 2018	Kalashnikov et al., 2016
50	Хибинская группа	Ф	Р, РЗЭ	Апатит	374 ± 4, tt, ns	Родионов и др., 2018	Kalashnikov et al., 2016
51	Джебель-Хамра	С	Zr, РЗЭ, Ta, Nb	Бастнезит, монацит, циркон	538 ± 15, wt, s	Qadhi, 2007	Jackson, Douch, 1986
52	Гурая	ЩГ	Zr, РЗЭ, Nb, Ta, U	Циркон, пирохлор, ксенотим, эшнит, самарскит	631 ± 8, z, o	Aseri, 2020	Aseri, 2020
53	Джебель-Тувалах	ЩГ	Zr, РЗЭ, Nb, Ta	Гагаринит, флюорит, фергусонит	637 ± 8, z, o	Aseri, 2020	Drysdall, Douch, 1986
54	Джебель-Сайид	ЩГ	Zr, РЗЭ, Nb, U	Циркон, синхизит, ксенотим, бастнезит	593 ± 2, z, ag	Moghazi et al., 2015	Aseri, 2020
55	Халзан-Буреттей	ЩГ	Zr, РЗЭ, Nb, Ta	Бастнезит, циркон, пирохлор, синхизит	392 ± 2, z, ag	Коваленко и др., 2004	Gronen et al., 2019
56	Мабуни	ГК	Nb, РЗЭ, Р, Та	Пирохлор, флоренсит, монацит	660 ± 13, ph, cb	Laval et al., 1988	Makanga, Edou-Minko, 2003
57	Белозиминское	ГК	РЗЭ, Р, Nb, Та	Монацит, паризит, бастнезит	643 ± 4, z, ns	Ярмолук и др., 2005	Фролов и др., 2003
58	Томтор	ГК	РЗЭ, Nb, Р, Sc	Монацит, флоренсит	391 ± 15, z, cb	Владыкин и др., 2014	Фролов и др., 2003
59	Кийское	ГК	РЗЭ, Р, Nb, Zr	Бастнезит, рабдофан, синхизит, паризит	251 ± 12, wt, ns	Плюснин и др., 1989	Фролов и др., 2003
60	Чуктукон	ГК	РЗЭ, Nb, Р, Mn, Fe, Sc	Монацит, флоренсит, пирохлор	257 ± 1, z, lm	Чеботарев и др., 2020	Ломаев, Сердюк, 2011
61	Какарсук	К	РЗЭ	Анхилит, бурбанкит, хуанхит, какарсуцит	164 ± 3, tn, cb	Secher et al., 2009	Hughes, Christiansen, 2011
62	Канганкунде	К	РЗЭ	Монацит, бастнезит	136 ± 11, mz + ap + wt, fn	Wall et al., 1994	Chikanda et al., 2019

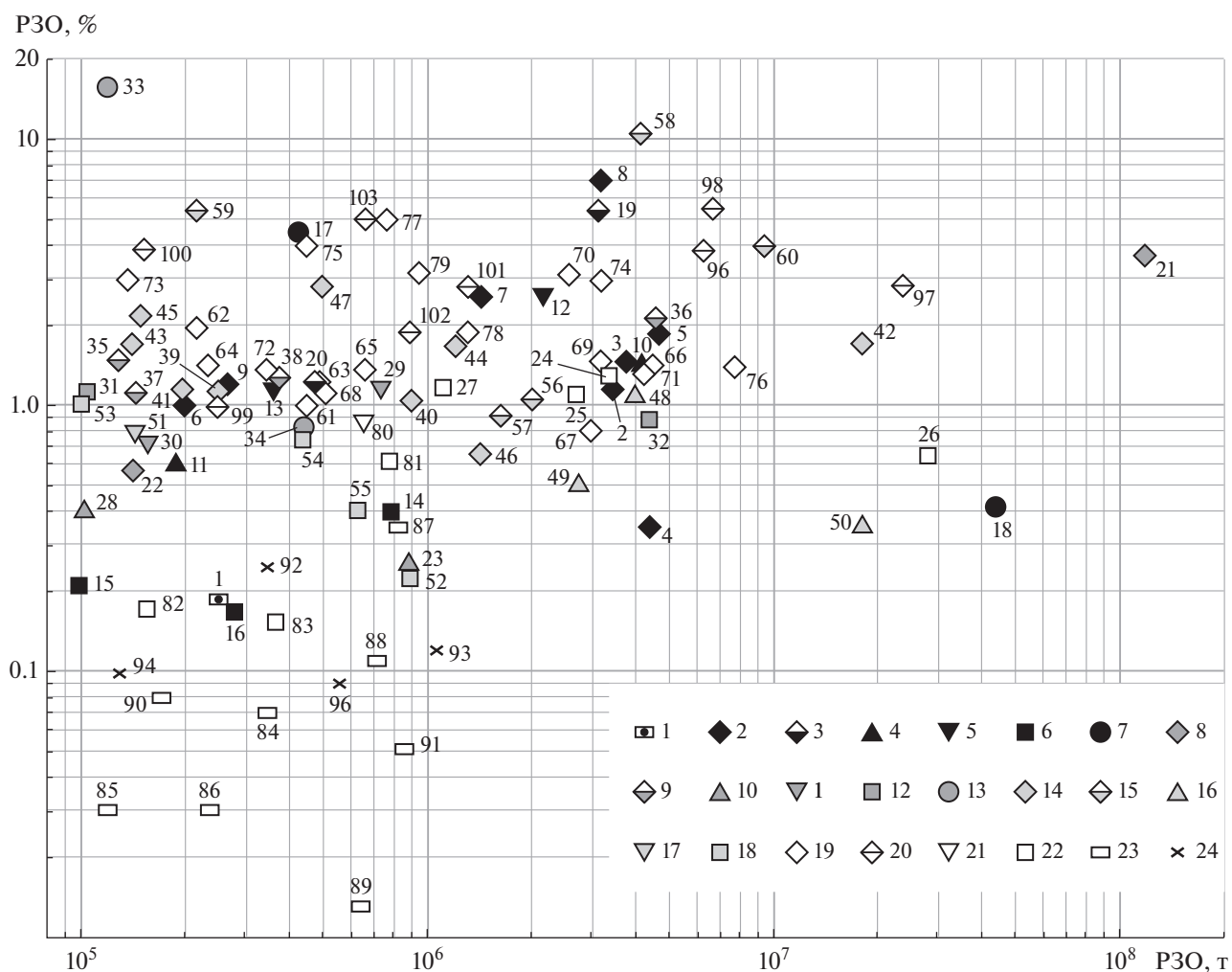
Таблица 2. Продолжение

№ ¹ пп	Месторождение	Тип ²	Компоненты в руде ³	Главные концентраты РЗЭ в руде	Возраст ⁴ (млн лет), минерал ⁵ , порода ⁶	Ссылки	
						геохронология	геология
63	Хотгор	К	РЗЭ, Р, Fe	Апатит, бастнезит	135 ± 3, <i>ph, ps</i>	Nikolenko et al., 2020	Gerel et al., 2021
64	Мушгай-Худаг	К	РЗЭ, Р, Fe	Апатит, бастнезит	135 ± 3, <i>ph, ps</i>	Nikolenko et al., 2020	Gerel et al., 2021
65	Сонгве	К	РЗЭ	Синхизит	133 ± 7, <i>z, cb</i>	Broom-Fendley et al., 2017	Broom-Fendley et al., 2017
66	Лонгонжу	К	РЗЭ	Монацит, бастнезит, рабдофан	137 ± 6, <i>ap, cb</i>	Amores, 2017	Pensana Metals Ltd, 2019
67	Лахджейра	К	РЗЭ, Nb, Fe	Бастнезит, пиррохлор	104 ± 4, <i>z, cb</i>	Montero et al., 2016	ОННУМ, 2020 ¹
68	Ламлага	К	РЗЭ, Nb, Fe	Бастнезит, пиррохлор	104 ± 4, <i>z, cb</i>	Montero et al., 2016	ОННУМ, 2020 ²
69	Твихинат	К	РЗЭ, Nb, Fe	Бастнезит, пиррохлор	104 ± 4, <i>z, cb</i>	Montero et al., 2016	Benouda et al., 2020
70	Вэйшань	К	РЗЭ	Бастнезит, паризит	130 ± 1, <i>bs, o</i>	Wang et al., 2019	Wang et al., 2019
71	Карасуг	К	РЗЭ, Fe, F, Ва	Бастнезит	118 ± 1, <i>bs, o</i>	Сальникова и др., 2010	Лебедев, 2013
72	Амба-Донгар	К	F, РЗЭ, Nb	Монацит, бастнезит, церит	65 ± 3, <i>ap, cb</i>	Fosu et al., 2019	Singh, 2020
73	Камгай	К	РЗЭ	Карбоцернаит, бастнезит, анкилит, синхизит	66 ± 1, <i>wg, ns</i>	Sheth et al., 2017	Singh, 2020
74	Маонюпин	К	РЗЭ, F, Ва, Рb	Бастнезит	26 ± 0.2, <i>bs, o</i>	Ling et al., 2016	Liu, Hou, 2017
75	Мулочжай	К	РЗЭ	Бастнезит	27 ± 0.2, <i>bs, o</i>	Ling et al., 2016	Liu, Hou, 2017
76	Намсе	К	РЗЭ, Ва	Синхизит, паризит, бастнезит	31 ± 1, <i>wg + ap + sn + pr + bs + mz + an, cb</i>	Nguyen et al., 2014	Nguyen et al., 2014
77	Далуцао	К	РЗЭ	Бастнезит	12 ± 0.2, <i>bs, o</i>	Ling et al., 2016	Liu, Hou, 2017
78	Ханнешин	К	РЗЭ	Ханнешит, карбоцернаит, синхизит, бастнезит	0.6 ± 0.1, <i>lc, pl</i>	Tucker et al., 2012	Tucker et al., 2012
79	Кызылджаорен	К	РЗЭ, F, Ва	Бастнезит, паризит	25 ± 1, <i>ph, cb</i>	Никифоров и др., 2014	Никифоров и др., 2014
80	Тунги	С	Zr, РЗЭ, Nb, Та	Эвдиалит, бастнезит	184 ± 19, <i>z, tr</i>	Meakin, Morgan, 1999	Spandler, Morris, 2016
81	Баэрчжэ	ЩГ	РЗЭ, Zr, Nb, Та, Ве	Хинганит, монацит	123 ± 1, <i>m, o</i>	Qiu et al., 2019	Qiu et al., 2019
82	Кристамас-Доум	ЩГ	РЗЭ, Zr, Nb, Та	Эвдиалит (?)	29 ± 1, <i>wr, pl</i>	Cohen et al., 2013	Chandler, Spandler, 2020
83	Клэрис-Доум	ЩГ	РЗЭ, Zr, Nb, Та	Эвдиалит (?)	29 ± 1, <i>wr, pl</i>	Cohen et al., 2013	Chandler, Spandler, 2020

Таблица 2. Продолжение

№ ¹ пп	Месторождение	Тип ²	Компоненты в руде ³	Главные концентраторы РЗЭ в руде	Возраст ⁴ (млн лет), минерал ⁵ , порода ⁶	Ссылки	
						геохронология	геология
84	Аксу-Диамас	Р	РЗЭ, Ti, Zr, Fe	Орпиг, чевкинит, сфен	<1, str, o	Deady et al., 2019	Deady et al., 2019
85	Кэйпл	Р	Ti, Zr, РЗЭ, Th	Монацит	<1, str, o	Hoatson et al., 2011	Hoatson et al., 2011
86	Чарли-Крик	Р	Ti, Zr, РЗЭ	Монацит, ксенотим	<2, str, o	Crossland..., 2013	Crossland..., 2013
87	Чатрапур	Р	Ti, Zr, РЗЭ, Th	Монацит	<1, str, o	Singh, 2020	Singh, 2020
88	Чавара	Р	Ti, Zr, РЗЭ, Th	Монацит	<1, str, o	Singh, 2020	Singh, 2020
89	Ричардс-Бэй	Р	Ti, Zr, РЗЭ, Th	Монацит	<1, str, o	Fockema, 1986	Fockema, 1986
90	Тролоньяро	Р	Ti, Zr, РЗЭ, Th	Монацит	<2, str, o	Van et al., 2020	Van et al., 2020
91	ВИМ-150	Р	Ti, Zr, РЗЭ, Th	Монацит, ксенотим	~10, str, o	Hoatson et al., 2011	Hoatson et al., 2011
92	Сюньву	И	РЗЭ	Галлуазит, каолинит	<50, ga, wc	Li et al., 2017	Li et al., 2017
93	Серра-Верде	И	РЗЭ	Каолинит, смектит	<50, ga, wc	Pinto-Ward, 2017	Pinto-Ward, 2017
94	Лоннань	И	РЗЭ	Галлуазит, каолинит	<50, ga, wc	Li et al., 2017	Li et al., 2017
95	Танталус	И	РЗЭ	Каолинит, смектит, иллит	<25, ga, wc	Ram et al., 2019	Ram et al., 2019
96	Мрима-Хилл	ГК	РЗЭ, Nb	Монацит, флоренсит	123 ± 6, ph, cb	Snelling, 1965	Pollard, Mapleson, 2013
97	Араша	ГК	P, Nb, РЗЭ, Ва	Монацит, флоренсит	89 ± 10, bi, cb	Sonoki, Garda, 1988	Neumann, Medeiros, 2015
98	Каталан I	ГК	Nb, РЗЭ, P, Ti	Монацит	78 ± 1, bd, ps	Guarino et al., 2017	Ribeiro, 2008
99	Каталан II	ГК	Nb, P, РЗЭ, Ti	Монацит	82 ± 3, p, lm	Guarino et al., 2013	Palmieri, 2011
100	Морру-ду-Ферру	ГК	РЗЭ, Fe	Флоренсит, бастнезит, церрианит, монацит	76 ± 1, ph, lm	Shea, 1992	Waber, 1992
101	Беар-Лодж	ГК	РЗЭ	Бастнезит, паризит, анкилит, монацит	51 ± 0, bi + k, cb	Andersen et al., 2017	Andersen et al., 2017
102	Зандкопелдрифт	ГК	РЗЭ, Mn	Монацит, флоренсит	56 ± 4, ph, cb	Harper et al., 2015	Harper et al., 2015
103	Донглао	ГК	РЗЭ, Ва, F	Бастнезит, паризит, синхизит, монацит	31 ± 1, wr + ap + sn + pr + bs + mz + an, cb	Nguyen et al, 2014	Nguyen et al, 2017

Примечание. ¹ Идентично с нумерацией месторождений на фиг. 1; ² см. таблицу 1; ³ в порядке убывания экономической значимости для каждого объекта; ⁴ курсивом выделены датировки, полученные на геологическом аналоге данного объекта, расположенном в том же районе; ⁵ al – орпиг (алланит), ap – анкерит, ar – апатит, bd – бадделейт, bi – биогит, bs – бастнезит, ga – геологический анализ, k – калишпат, lc – лейцит, mt – магнетит, mz – монацит, p – перовскит, ph – флогопит, pr – паризит, sn – синхизит, str – по стратиграфии, tp – танталонниобаты, tt – сфен (титанит), wr – изохрона по породе, z – циркон, zl – цирконолит; ⁶ ag – щелочной гранит, as – щелочной сиенит, bs – базальт, cb – карбонатит, fn – фенит, lm – лампрофир, ns – нефелиновый сиенит, o – руды, pl – флюид, pr – пантеллерит, ps – фоскорит, rd – риодацит, s – сиенит, sg – субщелочной гранит, tr – трахит-порфир, wc – рудовмещающая кора выветривания; * – возраст риодацита, на котором без размытия лежит карбонатитовый туф, входящий в состав карбонатитового комплекса.



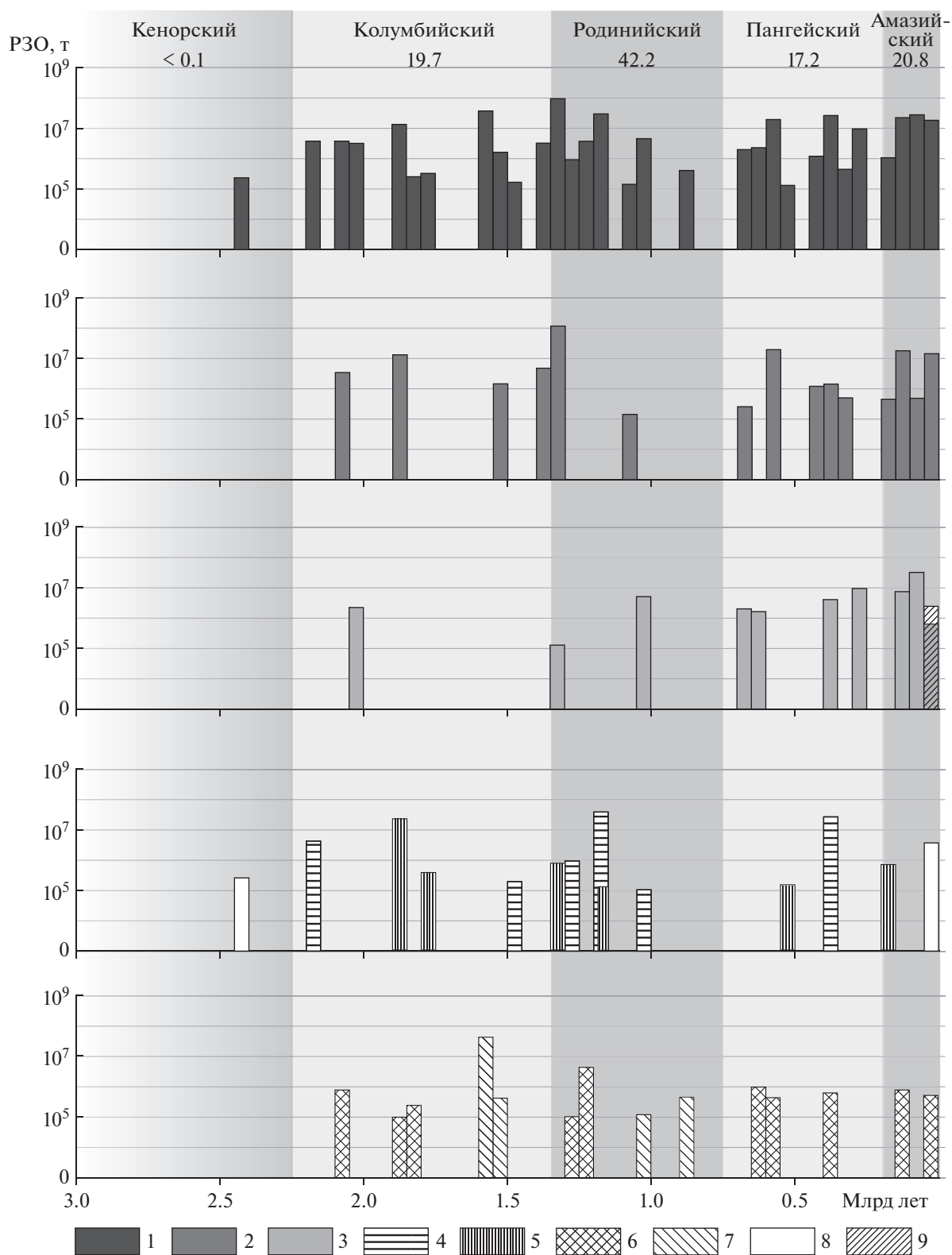
Фиг. 2. Ресурсы и средние содержания РЗЭ в месторождениях выборки, использованные для анализа. Шкала логарифмическая по двум осям. Номера точек соответствуют номерам месторождений в табл. 2. Условные обозначения типов месторождений и принадлежность циклам: 1 – россыпной кенорского цикла; 2–7 – колумбийский цикл: 2 – карбонатитовый, 3 – гипергенный в карбонатитах, 4 – фойидный, 5 – сиенитовый, 6 – щелочногранитный, 7 – субщелочногранитный; 8–13 – родинийский цикл: 8 – карбонатитовый, 9 – гипергенный в карбонатитах, 10 – фойидный, 11 – сиенитовый, 12 – щелочногранитный, 13 – субщелочногранитный; 14–18 – пангейский цикл: 14 – карбонатитовый, 15 – гипергенный в карбонатитах, 16 – фойидный, 17 – сиенитовый, 18 – щелочногранитный; 19–24 – амазийский цикл: 19 – карбонатитовый, 20 – гипергенный в карбонатитах, 21 – сиенитовый, 22 – щелочногранитный, 23 – россыпной; 24 – ионно-адсорбционный.

этого массива образуют объект с параметрами ниже лимита, установленного для нашей выборки, и он здесь упомянут только потому, что является древнейшей известной рудной залежью с рассматриваемой металлогенической специализацией.

В анализируемой выборке кенорский цикл представлен только палеороссыпями (фиг. 1, 2 и 3; табл. 2 и 3). В глобальном масштабе их ресурсы малозначимы (0.06% от всей выборки), но с научной точки зрения они очень интересны. Единственный известный объект (Эллиот-Лэйк) локализован в ураноносных метаконгломератах Гуронского бассейна (Канадский щит). Прежде эти руды добывались для извлечения урана и концен-

трирующегося в его минералах иттрия. Новые технологии сделали возможным рентабельное извлечение РЗЭ из монацита и ряда других минералов, присутствующих в этой руде (Workman et al., 2013). Однако уран в любом случае представляет главный интерес, определяя основную ценность объекта. В XXI в. здесь разведаны новые рудные залежи, но их эксплуатация пока отложена.

Колумбийский цикл (1.35–2.25 млрд лет). Этот цикл выражен в металлогении РЗЭ намного ярче, чем кенорский: 19 месторождений шести типов включают в себе 19.7% ресурсов всей выборки (фиг. 1, 2 и 3; табл. 2, 3). Почти половина в этом списке – представители карбонатитового типа.



Фиг. 3. Распределение ресурсов месторождений РЗЭ разных типов на оси геологического времени, разделенной на сегменты суперконтинентальных циклов. Шкала ресурсов в логарифмическом масштабе. Числа под названиями циклов – доля месторождений соответствующего цикла в суммарных ресурсах всей выборки в процентах. Условные обозначения. 1–9 – типы месторождений: 1 – все типы вместе, 2 – карбонатитовый, 3 – гипергенный в карбонатитах, 4 – фойдитный, 5 – сиенитовый, 6 – щелочногранитный, 7 – субщелочногранитный, 8 – россыпной, 9 – ионно-адсорбционный.

Таблица 3. Сравнение суперконтинентальных циклов по типам месторождений РЗЭ, количеству ресурсов и некоторым аспектам качества руд в них

Параметры	Циклы и их возрастные границы (млрд лет)					Все циклы
	Кенорский, >2.25	Колумбийский, 1.35–2.25	Родинийский, 0.75–1.35	Пангейский, 0.19–0.75	Амазийский, <0.19	
1*	2	3	4	5	6	7
Все типы						
N	1	19	18	22	43	103
Z	250	77231	165565	67591	81843	392480
S	0.06	19.68	42.19	17.22	20.85	100.0
Карбонатитовый тип (К)						
N	–	8	2	9	19	38
Z	–	21514	118243	23097	34872	197726
s	–	$\frac{5.5}{27.9}$	$\frac{30.1}{71.5}$	$\frac{5.9}{34.2}$	$\frac{8.9}{42.6}$	$\frac{50.4}{-}$
C _{REO}	–	$\frac{0.35-7.12}{2.2}$	$\frac{0.57-3.70}{3.7}$	$\frac{0.67-2.91}{1.7}$	$\frac{0.80-5.00}{1.8}$	$\frac{0.35-7.12}{3.0}$
X _{PrNd}	–	$\frac{16.3-33.9}{22.5}$	$\frac{19.4-21.7}{21.7}$	$\frac{13.2-25.0}{22.8}$	$\frac{11.8-22.1}{18.6}$	$\frac{11.8-33.9}{21.3}$
X _{Y+}	–	$\frac{0.6-13.0}{3.5}$	$\frac{2.0-9.8}{2.0}$	$\frac{1.0-8.4}{2.6}$	$\frac{0.4-7.2}{3.1}$	$\frac{0.4-13.0}{2.4}$
X _{LnY}	–	$\frac{0.5-7.0}{2.1}$	$\frac{1.5-4.9}{1.5}$	$\frac{0.8-3.8}{2.0}$	$\frac{0.4-3.7}{1.9}$	$\frac{0.4-7.0}{1.7}$
Гипергенный в карбонатах тип (ГК)						
N	–	2	4	5	8	19
Z	–	3583	5262	17546	38969	65360
s	–	$\frac{0.9}{4.6}$	$\frac{1.3}{3.2}$	$\frac{4.5}{26.0}$	$\frac{9.9}{47.6}$	$\frac{16.7}{-}$
C _{REO}	–	$\frac{1.25-5.54}{5.0}$	$\frac{1.13-2.16}{2.1}$	$\frac{0.93-10.59}{4.9}$	$\frac{0.98-5.01}{3.5}$	$\frac{0.93-10.59}{3.8}$
X _{PrNd}	–	$\frac{24.3}{24.3}$	$\frac{7.9-27.9}{21.2}$	$\frac{15.0-24.9}{18.5}$	$\frac{15.3-22.8}{20.5}$	$\frac{7.9-27.9}{20.2}$
X _{Y+}	–	$\frac{4.6}{4.6}$	$\frac{2.1-6.8}{2.6}$	$\frac{5.0-19.0}{6.4}$	$\frac{1.0-9.1}{3.3}$	$\frac{1.0-19.0}{4.2}$
X _{LnY}	–	$\frac{3.0}{3.0}$	$\frac{1.4-4.3}{1.7}$	$\frac{2.0-7.5}{3.4}$	$\frac{0.8-4.1}{1.7}$	$\frac{0.8-7.5}{2.2}$
Фойдный тип (Ф)						
N	–	2	6	3	–	11
Z	–	4344	36092	24754	–	65190
s	–	$\frac{1.1}{5.6}$	$\frac{9.2}{21.8}$	$\frac{6.3}{36.6}$	–	$\frac{16.6}{-}$
C _{REO}	–	$\frac{0.61-1.38}{1.3}$	$\frac{0.26-1.29}{0.7}$	$\frac{0.35-1.08}{0.5}$	–	$\frac{0.26-1.38}{0.7}$

Таблица 3. Продолжение

Параметры	Циклы и их возрастные границы (млрд лет)					Все циклы
	Кенорский, >2.25	Колумбийский, 1.35–2.25	Родинийский, 0.75–1.35	Пангейский, 0.19–0.75	Амазийский, <0.19	
1*	2	3	4	5	6	7
X_{PrNd}	–	$\frac{13.7-24.3}{23.8}$	$\frac{15.3-18.0}{15.8}$	$\frac{16.1-20.0}{18.7}$	–	$\frac{13.7-24.3}{17.4}$
X_{Y+}	–	$\frac{14.7-53.1}{16.4}$	$\frac{11.4-36.6}{27.0}$	$\frac{1.3-36.9}{10.9}$	–	$\frac{1.3-53.1}{20.1}$
X_{LnY}	–	$\frac{7.3-16.8}{7.7}$	$\frac{3.4-13.6}{10.0}$	$\frac{1.3-15.9}{5.0}$	–	$\frac{1.3-16.8}{7.9}$
Сиенитовый тип (С)						
N	–	2	2	1	1	6
Z	–	2522	895	144	662	4223
s	–	$\frac{0.6}{3.3}$	$\frac{0.2}{0.5}$	$\frac{0.04}{0.2}$	$\frac{0.2}{0.8}$	$\frac{1.1}{-}$
C_{REO}	–	$\frac{1.19-2.66}{2.4}$	$\frac{0.74-1.18}{1.1}$	$\frac{0.80}{0.80}$	$\frac{0.88}{0.88}$	$\frac{0.74-2.66}{1.9}$
X_{PrNd}	–	$\frac{23.0}{23.0}$	$\frac{16.6-20.6}{19.9}$	$\frac{18.2}{18.2}$	$\frac{18.2}{18.2}$	$\frac{16.6-23.0}{19.8}$
X_{Y+}	–	$\frac{12.0}{12.0}$	$\frac{6.2-39.0}{11.9}$	$\frac{18.5}{18.5}$	$\frac{23.3}{23.3}$	$\frac{6.2-23.3}{16.0}$
X_{LnY}	–	$\frac{7.0}{7.0}$	$\frac{3.0-15.3}{5.1}$	$\frac{7.3}{7.3}$	$\frac{7.4}{7.4}$	$\frac{3.0-15.3}{6.3}$
Щелочногранитный тип (ЩГ)						
N	–	3	2	4	3	12
Z	–	1164	4510	2050	1302	9026
s	–	$\frac{0.3}{1.6}$	$\frac{1.2}{2.7}$	$\frac{0.5}{3.0}$	$\frac{0.3}{1.6}$	$\frac{2.3}{-}$
C_{REO}	–	$\frac{0.17-0.39}{0.3}$	$\frac{0.90-1.11}{0.9}$	$\frac{0.23-1.03}{0.4}$	$\frac{0.15-0.6}{0.4}$	$\frac{0.15-1.11}{0.7}$
X_{PrNd}	–	$\frac{2.0-14.3}{8.2}$	$\frac{15.1-20.2}{15.2}$	$\frac{0.2-13.0}{7.6}$	$\frac{14.8-16.7}{15.5}$	$\frac{2.0-20.2}{12.6}$
X_{Y+}	–	$\frac{75.0-95.2}{80.8}$	$\frac{19.5-37.5}{37.1}$	$\frac{48.3-99.0}{69.0}$	$\frac{27.7-48.7}{40.3}$	$\frac{19.5-99.0}{50.4}$
X_{LnY}	–	$\frac{29.8-45.7}{33.8}$	$\frac{7.4-13.2}{13.1}$	$\frac{19.3-30.3}{24.4}$	$\frac{11.4-19.7}{16.4}$	$\frac{7.4-45.7}{18.8}$
Субщелочногранитный тип (СГ)						
N	–	2	2	–	–	4
Z	–	44104	563	–	–	44667
s	–	$\frac{11.2}{57.0}$	$\frac{0.1}{0.3}$	–	–	$\frac{11.3}{-}$
C_{REO}	–	$\frac{0.42-4.50}{0.5}$	$\frac{0.84-16.00}{4.10}$	–	–	$\frac{0.42-16.00}{0.5}$

Таблица 3. Продолжение

Параметры	Циклы и их возрастные границы (млрд лет)					Все циклы
	Кенорский, >2.25	Колумбийский, 1.35–2.25	Родинийский, 0.75–1.35	Пангейский, 0.19–0.75	Амазийский, <0.19	
1*	2	3	4	5	6	7
X_{PrNd}	–	$\frac{13.5-15.4}{15.4}$	$\frac{13.7-23.1}{15.7}$	–	–	$\frac{13.5-23.1}{15.4}$
X_{Y+}	–	$\frac{0.6-1.7}{1.7}$	$\frac{1.5-8.0}{2.9}$	–	–	$\frac{0.6-8.0}{1.7}$
X_{LnY}	–	$\frac{0.1-1.1}{1.1}$	$\frac{1.0-3.8}{1.6}$	–	–	$\frac{0.1-3.8}{1.1}$
Россыпной тип (P)						
N	1	–	–	–	8	9
Z	250	–	–	–	3923	4173
s	$\frac{0.06}{100.0}$	–	–	–	$\frac{1.0}{4.8}$	$\frac{1.1}{-}$
C_{REO}	$\frac{0.19}{0.19}$	–	–	–	$\frac{0.01-0.35}{0.1}$	$\frac{0.01-0.35}{0.1}$
X_{PrNd}	$\frac{19.5}{19.5}$	–	–	–	$\frac{18.9-25.3}{23.3}$	$\frac{19.9-25.3}{23.1}$
X_{Y+}	$\frac{7.2}{7.2}$	–	–	–	$\frac{1.5-21.3}{6.7}$	$\frac{1.5-21.3}{6.8}$
X_{LnY}	$\frac{3.6}{3.6}$	–	–	–	$\frac{1.0-8.4}{4.1}$	$\frac{1.0-8.4}{4.3}$
Ионно-адсорбционный тип (И)						
N	–	–	–	–	4	4
Z	–	–	–	–	2116	2116
s	–	–	–	–	$\frac{0.5}{2.6}$	$\frac{0.5}{-}$
C_{REO}	–	–	–	–	$\frac{0.09-0.25}{0.1}$	$\frac{0.09-0.25}{0.1}$
X_{PrNd}	–	–	–	–	$\frac{8.1-35.6}{24.4}$	$\frac{8.1-35.6}{24.4}$
X_{Y+}	–	–	–	–	$\frac{9.1-79.5}{24.5}$	$\frac{9.1-79.5}{24.5}$
X_{LnY}	–	–	–	–	$\frac{4.8-30.6}{11.3}$	$\frac{4.8-30.6}{11.3}$

Примечание. * Обозначения параметров сравнения: N – количество месторождений в выборке, Z – суммарное количество ресурсов в них (тыс. т P3O), S – доля суммы ресурсов цикла от суммы всей выборки, s – доля ресурсов конкретного типа из конкретного цикла, C_{REO} – среднее содержание в рудах (% P3O), X_{PrNd} – относительная доля оксидов празеодима и неодима в общей сумме P3O, X_{Y+} – относительная доля P3O иттриевой группы в общей сумме P3O, X_{LnY} – относительная доля оксидов лантаноидов иттриевой группы в общей сумме P3O; для s: выше черты – доля суммы ресурсов от всей выборки, ниже черты – доля от суммы ресурсов данного цикла; для остальных характеристик: выше черты – диапазон значений, ниже черты – средневзвешенное значение на величину соответствующих ресурсов P3O.

Они установлены на Украинском (Новополтавское), Канадском (Монтвиэль, Ашрам), Гренландском (Каррат) и Алданском (Селигдар) шитах, в тектонических блоках Арунта (Ноланс-Бор), Моха-ве (Маунтин-Пасс) и Каприкорн (Янгибана). Только в месторождениях Новополтавское и Селигдар РЗЭ не представляют единственный или главный экономический интерес.

На кратоне Йилгарн известно два крупных объекта, которые локализованы в латеритах по карбонатитам. Они оба связаны с крупным массивом Маунт-Уэлд. В его центре расположено одноименное месторождение, специализированное только на РЗЭ, а у северо-восточного края – месторождение Краун, в котором главным компонентом является Nb.

Фоидный тип представлен двумя месторождениями на Канадском (Нечалачо) и Балтийском (Норра-Черр) шитах. В обоих случаях первичным концентратором РЗЭ в рудах был определен эвдиалит, но в Нечалачо он в пределах оконтуренных рудных тел практически полностью замещен полиминеральным агрегатом (табл. 2) в результате эпигенетического метасоматоза (Möller, Williams-Jones, 2016).

Сиенитовый тип в этом цикле представляют два объекта на Украинском (Азовское) и Сино-Корейском (Чонджу) шитах. Последнее месторождение, находящееся в КНДР, является некоторой загадкой для геологической общественности, т.к. по данным геологоразведочных работ, проведенных северокорейскими специалистами, это крупнейшее месторождение РЗЭ в мире, которое в 2–10 раз (оценки варьируются при разных средних содержаниях) крупнее гигантского Баянь-Обо. Однако такая информация циркулировала только в общемедийных источниках в 2013–2014 гг. и ни разу не была подтверждена публикациями в профессиональных изданиях горно-геологического профиля. Не существует даже общедоступного описания геологии самого месторождения. Известно только описание вмещающего сиенитового массива (Kim et al., 2016). Поэтому специалисты во всем мире, как и авторы этой статьи, с большим скепсисом относятся к обнародованной ресурсной оценке Чонджу. В нашем исследовании использована оценка, которая равна сотой доле от максимально заявленной суммы ресурсов в этом месторождении, что все равно оставляет его самым крупным в своем типе (фиг. 2).

Месторождения, представляющие рассматриваемый период в щелочногранитном типе, установлены на Алданском (Катугинское) и Гвианском (Питинга) шитах, а также в поясе Холлз-Крик (Брокмэн). Все они содержат поликомпонентные руды. При этом месторождение Брокмэн выделяется тем, что минерализация локализована не в интрузии, как у большинства представи-

телей типа, а в породах эффузивной фации (Ramsden et al., 1993).

Самые значительные ресурсы цикла сосредоточены в двух месторождениях субщелочногранитного типа, выявленных на кратоне Голер (Олимпик-Дэм) и в тектоническом блоке Маунт-Айза (Мэри-Кэтлин). Олимпик-Дэм – крупнейший ресурс РЗЭ, известный в колумбийском цикле (56.5% суммы ресурсов цикла), но с очень бедными рудами как по общей сумме РЗО (фиг. 2), так и по доле в ней высококостоймых РЗЭ. В настоящее время здесь из руд извлекают Cu, Au, U и Ag, а минералы-концентраторы Fe и РЗЭ накапливаются в хвостах обогащения. Из руд Мэри-Кэтлин извлекали только U, а РЗЭ ушли в хвосты обогащения: их среднее содержание в руде высокое (фиг. 2), но обеспечивается ортитом и стиллуэлитом, менее удобными в переработке минералами, чем карбонаты и фосфаты РЗЭ, из которых в основном получают легкие лантаноиды в настоящее время.

Из всех месторождений колумбийского цикла только Маунтин-Пасс и Маунт-Уэлд эксплуатируются для извлечения РЗЭ. Большинство других объектов этого периода также не остались без внимания профильных компаний и служб, которые провели там в последнее десятилетие геологоразведочные работы с оценкой или переоценкой их запасов или ресурсов.

Родинийский цикл (0.75–1.35 млрд лет). Это самый продуктивный цикл по количеству оцененных ресурсов РЗЭ. Как и предшествующий ему колумбийский, он представлен месторождениями тех же шести типов, но его доля в сумме ресурсов РЗО всей выборки вдвое больше (фиг. 1, 2 и 3; табл. 2 и 3). Нельзя не отметить и несколько иные количественные соотношения объектов разных типов и их вкладов в сумму ресурсов.

Карбонатитовый тип представлен только двумя месторождениями на Сино-Корейском (Баянь-Обо) и Канадском (Клэй-Хауэллс) шитах. Именно данный тип имеет максимальную долю в суммарных ресурсах цикла – 71.5%. Причем, если Клэй-Хауэллс является во всех отношениях рядовым объектом (фиг. 2), то Баянь-Обо – сырьевой гигант (30% суммы ресурсов всей выборки) с самыми большими в мире запасами и крупнейшим объемом добычи. Извлечение РЗЭ из руд Баянь-Обо началось в середине XX века и имеет явную тенденцию к увеличению: в XXI веке около половины всех легких РЗЭ, использованных промышленностью в мире, добыто из этого месторождения. По поводу его происхождения до сих пор ведется оживленная дискуссия (Deng et al., 2017; и ссылки там). Сейчас большинство специалистов связывают главную фазу его формирования с карбонатитовым процессом в мезопротерозое. Затем было несколько эпизодов регенерации руд с огра-

ническим привнесом вещества постметаморфическими и постмагматическими флюидами в подвижной тектонической зоне, неоднократно активизировавшейся в позднем протерозое и палеозое.

Гипергенные залежи руд РЗЭ в карбонатитовых комплексах родинийского цикла установлены на кратонах Амазонас (Сейс-Лагос) и Каапваль (Гленовер), в поясах Холлз-Крик (Камминс-Рэндж) и Убенди (Нгвалла). Последний объект имеет наиболее значительную ресурсную оценку при самом высоком значении среднего содержания РЗО в этом перечне (фиг. 2).

Доля фойдного типа в сумме ресурсов этого цикла (21.8%) уступает только доле карбонатитового типа (табл. 3). Все месторождения представляют собой стратиформные залежи в расслоенных щелочных комплексах, находящихся на Гренландском (Моцфельт-Ариэс, Кванефельд, Соренсен, Зона 3, Танбрез) и Канадском (Кипава-Лэйк) щитах. Примечательно, что в одном интрузивном массиве на разных горизонтах могут находиться руды разных минеральных типов, а потому и с разным комплексом полезных компонентов и заметно отличающейся конфигурацией спектра РЗЭ. В частности, в луавриитовых слоях в верхней части плутона Илимауссак (Кванефельд, Соренсен, Зона 3) РЗЭ преимущественно сконцентрированы в стенструпине совместно с U (Paulick et al., 2015). В нижних рудных горизонтах той же интрузии, имеющих короткокиловый состав, РЗЭ сосредоточены в эвдиалите (Танбрез), что предопределяет их неразрывную связь в руде с Zr и очень низкую радиоактивность этой руды.

Сиенитовый тип представлен месторождениями на Канадском щите (Ту-Том) и в тектоническом блоке Явапай-Мазатзал (Пахарито-Маунтин). Особенностью первого из них является высокий уровень метаморфизма вплоть до превращения в гнейсовидную породу и соответствующую регенерацию первичных руд (Daigle, 2012), а особенностью второго – расслоенность вмещающей интрузии, что не очень типично для бесфойдных сиенитов (Berger, 2018).

Оба объекта щелочногранитного типа родинийского цикла находятся на востоке Канадского щита (фиг. 1), но имеют между собой существенные отличия в геологическом строении. Месторождение Фокстрот локализовано в минерализованных эффузивных породах, которые были интенсивно метаморфизованы в гренильскую орогению (Miller, 2015), а месторождение Стрэндж-Лэйк разведано в наиболее лейкократовой части крупной интрузии с пегматоидной центральной зоной, где установлены наиболее богатые руды (Gysi et al., 2016).

Субщелочногранитный тип имеет минимальную долю в сумме ресурсов РЗЭ родинийского цикла (фиг. 3). Его представляют также два ме-

сторождения, одно из которых расположено в поясе Намаква (Стенкампскрал), а другое – на краю платформы Янцзы (Шин-Куен). Оба объекта затронуты эксплуатацией. Частично отработанные жильные рудные тела месторождения Стенкампскрал содержат самые богатые руды во всей анализируемой выборке (фиг. 2), но в период их добычи в середине XX в. главным компонентом для извлечения считались не РЗЭ, а торий (Harmer, Nex, 2016). Месторождение Шин-Куен эксплуатируется до сих пор, но из руды извлекается только медь.

Из всех перечисленных объектов родинийского цикла для добычи РЗЭ, а также Fe, в настоящее время эксплуатируется только Баянь-Обо. На большинстве остальных месторождений этого периода, за исключением Сейс-Лагос, Пахарито-Маунтин и Шин-Куен, в XXI в. проводились объемные геологоразведочные работы, включавшие оценку или переоценку ресурсного потенциала РЗЭ.

Пангейский цикл (0.19–0.75 млрд лет) уступает по сумме ресурсов всем циклам, кроме кенорского, но значительно – только родинийскому (табл. 3). По разнообразию типов месторождений он также превосходит только кенорский цикл (фиг. 1, 2 и 3).

Наибольшее количество месторождений для этого отрезка геологического времени установлено в карбонатитовом типе (табл. 2 и 3). Они выявлены в поясах Убенди (Нкомбва-Хилл), Свеконорвежском (Фен), Циньлин (Мяоя, Тайпинчжэнь) и Кордильерском (Уичида), а также на Канадском (Лавернь, Сент-Онорэ), Гренландском (Сарфарток) и Балтийском (Африканда) щитах (фиг. 1). Последнее месторождение – единственный объект выборки, в котором главным концентратом РЗЭ является перовскит (Афанасьев, 2011).

Гипергенные залежи руд РЗЭ в карбонатитовых комплексах пангейского цикла установлены на Сибирской платформе (Белозиминское, Томтор, Кийское, Чуктукон) и кратоне Конго (Мабуни). Месторождение Томтор содержит самые богатые руды в своем типе среди всех циклов (фиг. 2).

Фойдный тип, при относительной немногочисленности объектов в выборке, имеет максимальную долю в сумме ресурсов пангейского цикла (табл. 3). Тип представлен стратиформными залежами двух гигантских интрузивных комплексов Балтийского щита – Хибинского и Ловозерского. Причем в последнем известно два вида руд: РЗЭ-Ta–Nb в лопаритовых луавритах и Zr-РЗЭ в немного более поздних эвдиалитовых луавритах (Kalashnikov et al., 2016).

Единственный представитель сиенитового типа в пангейском цикле находится на Аравийском щите (Джебел-Хамра). Его доля в сумме ресурсов этого цикла крайне мала.

Там же, на Аравийском щите, выявлены три месторождения щелочногранитного типа (Гурая, Джебель-Тувалах, Джебель-Сайид). Список полезных компонентов в них очень похож на список их “соседа” из сиенитового типа (табл. 2), но соотношения легких и тяжелых РЗЭ в рудах месторождений двух типов различаются весьма значительно (см. след. раздел). Еще одно крупное месторождение этого типа находится в Алтайском поясе (Халзан-Бургетей).

Из всех месторождений цикла для целенаправленного извлечения РЗЭ, Nb, Ta и Ti уже много лет эксплуатируются только лопаритовые руды Ловозерского массива. Небольшие ежегодные объемы редкоземельной продукции производятся из апатитового концентрата месторождения Олений ручей, входящего в Хибинскую группу. Месторождения Мабуни, Африканда, Томтор и Чуктукон интенсивно изучаются многие годы и в геологическом, и в технологическом аспектах, и начало их освоения в ближайшее время очень вероятно. На месторождении Сент-Онорэ эксплуатируются ниобиевые руды, а залегающие отдельно от них тела с редкоземельной минерализацией только предварительно оценены и требуют доизучения в ряде аспектов. Последнее можно отнести и к остальным месторождениям пангейского цикла нашей выборки.

Амазийский цикл (<0,19 млрд лет) еще продолжается, находясь приблизительно на трети от своего начала. По количеству оцененных ресурсов РЗЭ он вполне сопоставим, но немного превосходит колумбийский и пангейский циклы и при этом значительно превосходит все циклы по количеству известных объектов. В нашей выборке это прежде всего заметно при количественном сравнении месторождений, связанных с карбонатитовыми комплексами – как гипогенных, так и в их корах выветривания (табл. 3). Месторождения этих двух типов содержат в сумме больше 90% оцененных ресурсов РЗЭ данного цикла.

Месторождения карбонатитового типа амазийского цикла образуют максимальную по количеству объектов группу во всей выборке (фиг. 1 и 2; табл. 2 и 3). Они установлены на Гренландском (Какарсук), Ангольском (Лонгонжу), Сино-Корейском (Вэйшань) и Индийском (Амба-Донгар, Камтай) щитах, в Мозамбикском (Кангакунде, Сонгве), Мавританском (Лахджейра, Ламлага, Твихинат), Центрально-Азиатском (Хотгор, Мушгай-Худаг, Карасуг) и Альпийско-Гималайском (Кызылджаорен, Ханнешин) поясах, на активизированном краю платформы Янцзы (Маонюпин, Мулочжай, Намсе, Далуцао). Месторождения Хотгор и Мушгай-Худаг выделяются на общем фоне этих объектов не очень типичным главным минералом-концентратом РЗЭ, которым здесь является апатит: в отдельных образцах

содержание РЗЭ в нем достигает 40%, а в среднем составляет около 15% (Nikolenko et al., 2020; Yang et al., 2016).

Гипергенные залежи руд РЗЭ в карбонатитовых комплексах амазийского цикла установлены на Южно-Американской (Араша, Каталан I, Каталан II, Морру-ду-Ферру), Северо-Американской (Беар-Лодж), Южно-Африканской (Зандкопсдриффт) и Янцзы (Донгпао) платформах, а также в Мозамбикском поясе (Мрима-Хилл).

Фоидный и субщелочногранитный типы в цикле никак не представлены, а сиенитовый – только месторождением Тунги (Лахланский пояс). Оно занимает весь объем субвулканического лакколита трахитовых порфиоров, в котором достаточно равномерно распределена тонкодисперсная и при этом повсеместно агрегированная в полифазных сростках редкометалльная минерализация (Spandler, Morris, 2016). Основными концентраторами РЗЭ в этих рудах являются сложные силикаты циркония из группы эвдиалита, но часть РЗЭ заключена в карбонатах постмагматической стадии.

Щелочногранитный тип дал в выборку цикла три представителя, которые находятся в Центрально-Азиатском поясе (Баэрчже) и бассейне Боуэн (Кристинмас-Доум, Клэрис-Доум). Компонентный состав руд этих месторождений очень схож, но минеральный – сильно различается. В частности, в Баэрчже основная часть Zr и РЗЭ распределены в разных минералах, для которых можно получить отдельные концентраты: циркон для Zr и хинганит с монацитом для РЗЭ (Qiu et al., 2019). В австралийских объектах все эти элементы заключены в тонкодисперсном минерале группы эвдиалита, который из-за своей размерности предварительному концентрированию не подлежит (Chandler, Spandler, 2020).

Амазийский цикл вполне объяснимо выделяется на фоне остальных циклов широким распространением экзогенных месторождений РЗЭ, возникших за счет гипергенеза геологических формаций, изначально не имевших не то что рудные, но обычно даже просто повышенные концентрации этих элементов – это россыпи и “ионные глины”.

Молодые (редко древнее миоцена) нелитифицированные россыпи – главный промышленный источник Ti и Zr (ильменит, рутил, лейкоксен, циркон). Касситеритовые россыпи – важный источник Sn. Монацит почти всегда имеет значительные концентрации в таких объектах, но редко попутно извлекается, а его ресурсы далеко не всегда оцениваются. Причина заключается в высоком содержании в нем тория. Например, в россыпных месторождениях Австралии средние содержания ThO₂ в монаците обычно составляют 6–8%, а в их аналогах в Индии – 6.5–12.5% (Hoat-

son et al., 2011; Singh, 2020). Среди всех объектов других типов в анализируемой выборке сопоставимые значения зафиксированы только в монаците месторождения Стенкампскрал (Andreoli et al., 1994). Интересно, что в монаците древнего аналога молодых россыпей Эллиот-Лэйк, рассмотренного при описании кенорского цикла, содержится меньше тория ($1.3\text{--}3.4\%$ ThO_2), но это может быть связано с метаморфизмом руд и перераспределением тория в новообразованные торит и ураноторит (Workman et al., 2013).

Широкомасштабное использование тория возможно только в атомной энергетике, (Gambogi, Ghalayini, 2020). В мире около 20 стран имеют исследовательские программы по созданию энергетических атомных реакторов на основе тория, но только Индия официально обнародовала крупномасштабную программу по промышленному внедрению таких реакторов. Поэтому практически все Ti–Zr россыпные месторождения этой страны оцениваются и на ресурсы монацита тоже. При переработке песков он извлекается в отдельный концентрат, из которого получают для дальнейшего использования не только РЗЭ, но и соединения тория (Singh, 2020). В других странах (Бразилия, Малайзия, Таиланд), чтобы не иметь экологически обусловленных издержек, связанных с необходимостью безопасно хранить радиоактивные отходы, монацит извлекается из Ti–Zr и касситеритовых россыпей в ограниченном количестве и только в экспортных целях для потребителей в Китае и Индии.

В анализируемой выборке среди россыпных месторождений преобладают объекты прибрежно-морского типа. Все они находятся на океаническом побережье Индии (Чатрапур, Чавара), ЮАР (Ричардс-Бэй), Мадагаскара (Тролоньяро) и Австралии (Кэйпл, ВИМ-150). В действительности таких месторождений в мире многократно больше, но их монацитовые ресурсы не оценивались при геологоразведочных работах из-за описанной выше ториевой проблемы.

В выборке есть также два представителя флювиального типа россыпей. Месторождение Чарли-Крик (Австралийская платформа) выделяется повышенной концентрацией ксенотима (16% от его суммы с монацитом) (Crossland..., 2013). Большая доля ксенотима (15–30% от суммы с монацитом) в принципе более характерна именно для флювиальных россыпей (не только Ti–Zr, но и касситеритовых), чем для их прибрежно-морских аналогов (Gupta, Krishnamurthy, 2005; Eisner, 2010). Среди последних такие объекты очень редки: сопоставимая доля ксенотима (22%) достоверно зафиксирована только в месторождениях бассейна Мюррей, самым значительным из которых является ВИМ-150 (Eisner, 2010).

Очень своеобразный представитель флювиального типа россыпей в выборке – месторождение Аксу-Диамас (или Чанакли) в Альпийско-Гималайском поясе. Оно возникло не в результате регионального размыва полиформационного комплекса пород, а как продукт локального перемыва тефры одного кайнозойского вулкана (Deady et al., 2019). Отсюда необычная для месторождений РЗЭ россыпного типа минералогия (табл. 2) и менее масштабная ториевая проблема при возможной эксплуатации.

“Ионные глины” – самый маломасштабный тип в ресурсной базе РЗЭ (табл. 3), но при этом важнейший промышленный источник иттриевых (но не только) РЗЭ для главного их продуцента в мире – Китая. Именно там объекты данного типа были впервые выявлены и начали разрабатываться (Xie et al., 2016). При эксплуатации таких месторождений извлекаемыми являются только те РЗЭ, что адсорбированы глинистыми минералами в виде ионных гидроксильных комплексов (Borst et al., 2020). Рудоносные горизонты также содержат минералы, в которых РЗЭ структурно связаны, а их доля в балансе РЗЭ может местами превышать половину, но они не являются источником получения РЗЭ в таких рудах из-за особенностей применяемых технологий.

Месторождения данного типа редко содержат крупные запасы. Поэтому из китайских объектов в анализируемую выборку попали только крупнейшие эксплуатируемые из них: Лоннань и Сюньву (оба – провинция Цзянси). В последние годы их аналоги начали выявлять и разведывать и в других странах тропического пояса: Бразилии (Серра-Верде) и Мадагаскаре (Танталус) (фиг. 1).

Вероятно, значительные эксплуатируемые месторождения такого типа есть на северо-востоке Мьянмы, откуда Китай получает до половины от своего собственного производства иттриевых РЗЭ. Однако никакой ресурсной оценки этих объектов в открытых источниках нет. В медиа-источниках также есть информация о геологоразведочных работах на объектах подобного типа в Чили и Уганде, но представительная геологическая информация по ним в общем доступе пока также отсутствует.

МЕЖЦИКЛОВОЕ СРАВНЕНИЕ ТИПОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПО КОЛИЧЕСТВУ РЕСУРСОВ И КАЧЕСТВЕННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ РУД

Глобальные объемы потребления индивидуальных РЗЭ в виде металлов или их химических соединений очень различны. В самом первом приближении эти количества коррелируются с распространенностью элементов: цериевые редкие земли и иттрий имеют как более высокие

Таблица 4. Кларки РЗЭ, приблизительные годовые объемы потребления РЗО в мире, цены производителей

Элемент	Кларк в верхней земной коре, ppm ¹	Потребление, тыс. тонн ²	Цена 1 кг РЗО в декабре 2020 г. ³	
			чистота продукта, %	долл. США
La	31	43	99.900	1.43
Ce	63	65	99.900	1.46
Pr	7.1	7	99.500	47.18
Nd	27	33	99.500	53.02
Sm	4.7	1	99.900	1.83
Eu	1.0	0.6	99.999	29.94
Gd	4.0	2	99.990	28.92
Tb	0.7	0.7	99.990	717.20
Dy	3.9	1.5	99.500	255.62
Ho	0.83	0.2	99.500	62.81
Er	2.3	0.5	99.500	23.37
Tm	0.30	<0.1	99.900	1317.28
Yb	2.0	<0.1	99.990	14.9
Lu	0.31	<0.1	99.990	628.09
Y	21	11	99.999	2.85

Прмечание. ¹ по (Rudnick, Gao, 2003); ² по (Batapola et al., 2020); полужирным курсивом выделены значения для РЗЭ с прогнозируемым ростом промышленного потребления (Adamas Intelligence, 2019; Goodenough et al., 2018). ³ Все цены, кроме оксида тулия, по данным Института редких земель и стратегических металлов/ Institute of Rare Earths and Strategic Metals (ФРГ). URL: <https://en.institut-seltene-erden.de/our-service-2/Metal-prices/rare-earth-prices/> (доступ 31.03.2021); цена оксида тулия по данным Chemcraft Ltd. (РФ). URL: https://chemcraft.su/product/22955?field_packaging%5B0%5D=250 (доступ 31.03.2021)

кларки концентрации в земной коре и более значительные содержания в рудах, так и более масштабные объемы потребления промышленностью, чем тяжелые лантаноиды (табл. 4). Тем не менее, на данный момент все же существует дисбаланс между распространенностью индивидуальных РЗЭ в добываемых рудах, с одной стороны, и структурой потребления этих элементов в промышленности, с другой стороны, что сильно сказывается на их рыночных ценах. Например, в последние годы среди цериевых РЗЭ достаточно высокие цены установились на Pr и Nd. Среди иттриевых РЗЭ существуют высокие цены на все тяжелые лантаноиды, а на некоторые из них — очень высокие, притом, что объемы потребления всех Ln₇ относительно небольшие (табл. 4). Специалисты прогнозируют, что эти элементы на обозримую перспективу сохраняют, как минимум,

стабильно высокий спрос, а для таких РЗЭ, как Pr, Nd, Tb, Dy и Ho он будет даже увеличиваться с возможным возникновением существенного дефицита и соответствующего еще большего роста цен (Adamas Intelligence, 2019; Goodenough et al., 2018; Paulick, Machacek, 2017; Weng et al., 2015). Для La, Ce и Y ситуация совсем иная: несмотря на очень большие объемы потребления промышленностью, рынок устойчиво насыщен этими металлами и Sm, а в отдельные периоды даже перенасыщен. Некоторые производители вынуждены их реализовывать на уровне себестоимости или ниже ее, сводя экономический баланс за счет более дефицитных лантаноидов (Golev et al., 2014). Никаких оснований для прогнозирования существенных колебаний уже имеющихся невысоких цен на эти элементы нет.

По большинству месторождений выборки (95 из 103) были собраны количественные данные не только о средних суммарных содержаниях РЗО в рудах, но и по всему спектру индивидуальных РЗЭ. Это дало возможность впервые провести сравнение месторождений в этих аспектах как одного типа, но в разные эпохи, так и отдельных типов между собой. Причем при анализе содержаний отдельных групп РЗЭ акцент сделан на наиболее дорогостоящих на мировом рынке элементах — Pr, Nd и Ln_Y, которые и в настоящее время и на прогнозную перспективу представляют особый интерес как для горнодобывающих, так и геологоразведочных компаний по ценовому признаку.

Карбонатитовый тип. Этот тип включает в себе половину всех ресурсов выборки. Основу минералогии их руд обычно составляют карбонаты и фосфаты, в том числе и с очень высокими содержаниями РЗЭ (табл. 1). Тип имеет достаточно высокие значения среднего содержания РЗО в рудах ($C_{\text{REO}} = 3.0\%$) при относительно большой доле Pr и Nd ($X_{\text{PrNd}} = 21.1\%$), но при малозначимой доле иттриевых РЗЭ (табл. 3, фиг. 4).

Родинийский цикл выделяется на общем фоне не только максимальной долей ресурсов, сосредоточенных в данном типе, но и тем, что только в нем величина C_{REO} выше средней по типу. Связано это исключительно с крупнейшим в мире месторождением Баянь-Обо. Значение X_{PrNd} в его рудах также выше среднего по всему типу, но не намного (табл. 3).

В колумбийском цикле выделяется месторождение Янгибана самым высоким значением X_{PrNd} по типу — 33.9% (фиг. 1, 3). В отличие от Баянь-Обо, оно относительно небольшое на фоне своих однотипных аналогов из того же цикла (фиг. 2), и поэтому такая выдающаяся величина X_{PrNd} в нем слабо отразилась на средневзвешенном значении этого показателя для всего цикла (табл. 3). В списке объектов колумбийского цикла также присутствует месторождение Каррат, имеющее самое высокое по типу значение доли в руде как суммы всех тяжелых РЗЭ ($X_{Y+} = 13\%$), так и отдельно лантаноидов этой группы ($X_{\text{LnY}} = 7\%$), что в 4–5 раз выше среднего по типу (фиг. 4, табл. 3). При этом следует отметить, что месторождение находится в ранней стадии изучения и оценки (Mott et al., 2013), а потому эти цифры можно рассматривать только как предварительные.

В пангейском цикле фиксируется самое низкое для типа значение $C_{\text{REO}} = 1.7\%$, но при этом и самое высокое значение $X_{\text{PrNd}} = 22.8\%$ среди всех циклов в рассматриваемом типе. Самое большое влияние на эти значения оказали показатели месторождения Сент-Онорэ (1.73 и 23.6% соответственно), оцененные ресурсы которого составляют почти 80% от ресурсов этой группы месторож-

дений. Также высокие значения X_{PrNd} имеют руды месторождений Фен (22.8%) и Сарфарток (25.0%), но их ресурсы значительно меньше (фиг. 2). Минимальное же значение этого параметра в рассматриваемой части выборки выявлено на месторождении Уичида (13.2%).

Самое низкое значение X_{PrNd} по карбонатитовому типу выявлено в амазийском цикле (18.6%). Самые крупные месторождения в этой части выборки Лонгонжу, Карасуг и Намсе имеют эту характеристику руд на более высоком уровне (22%), но их доля в сумме соответствующих ресурсов меньше половины. Другую часть ресурсов представляют месторождения с заметно более низкими значениями параметра, вплоть до самых низких значений для всего типа в интервале 11.8–12.7%, которые установлены в месторождениях Мулочжай, Вэйшань и Далуцао (фиг. 4).

Гипергенный в карбонатитах тип, как и собственно карбонатитовый тип, также имеет месторождения во всех циклах, кроме кенорского, но при этом втрое меньшую долю в суммарных ресурсах выборки (табл. 3). В данном типе представительство от колумбийского и родинийского циклов меньше, чем у двух более поздних циклов, с которыми также связан и основной объем ресурсов. Средние значения X_{PrNd} и X_{LnY} у двух типов очень близки, но величина $C_{\text{REO}} = 3.8\%$ у гипергенного типа заметно выше. Причем она выше, чем у любого другого типа во всей выборке. Вместе с тем для редкоземельной минерализации таких месторождений присущи некоторые “недостатки”, сказывающиеся на их технологичности: высокая дисперсность основной части минералов-концентраторов РЗЭ и их сложные взаимные сращения с оксидами/гидроксидами железа. Из-за этого предварительное обогащение таких руд с приемлемым уровнем потерь — очень трудная задача, которая в настоящее время решена на уровне промышленного использования только на месторождении Маунт-Уэлд. Современные исследования в этом направлении все чаще приводят специалистов к выводу о том, что богатые руды такого типа необходимо сразу отправлять на прямой передел гидрометаллургическими методами. С одной стороны, это лишает их изначального преимущества в высоких содержаниях РЗЭ относительно месторождений, где предварительное обогащение возможно. Однако, с другой стороны, такой способ переработки руды обеспечивает более высокий конечный уровень извлечения РЗЭ (Лихникевич и др., 2019; Neumann, Medeiros, 2015; Serdyuk et al., 2017). Кроме того, он также позволяет при необходимости выборочно расширять перечень попутно извлекаемых ценных компонентов, обычно уходящих в хвосты обогащения в более традиционных схемах переработки руд.

Как максимум (27.9%), так и минимум (7.9%) X_{PrNd} для типа установлен в месторождениях родинийского цикла Гленовер и Сейс-Лагос соответственно (фиг. 4). Очень низкие значения X_{PrNd} в рудах Сейс-Лагос сопровождаются ярко выраженной аномалией церия и доминированием церианита среди минералов-концентраторов РЗЭ, что указывает на очень большую степень окисления всего вещества в этой латеритной коре (Giovannini et al., 2017).

Среди остальных месторождений также выделим Маунт-Уэлд из колумбийского цикла и Мабуну из пангейского цикла, которые по величине X_{PrNd} (24.3 и 24.9% соответственно) вместе с месторождением Гленовер входят в первую тройку в своем типе. При этом самое низкое среднее значение этого параметра получено для пангейского цикла (табл. 3), т.к. все его месторождения, кроме Мабуну, имеют данный показатель в интервале 15.0–18.6% (фиг. 4).

В отношении иттриевых РЗЭ данный тип мало отличается от собственно карбонатитового. Единственным объектом, который может быть выделен на общем фоне, является предварительно оцененное месторождение Кийское с $X_{Y+} = 19\%$ и $X_{LnY} = 7.5\%$.

Фоидный тип сопоставим с гипергенным типом в карбонатитах по количеству оцененных ресурсов, хотя общее число представляющих его месторождений почти вдвое меньше, и они формировались только в трех циклах (фиг. 2; табл. 3). Наиболее значительные ресурсы связаны с родинийским и пангейским циклами – 55 и 38% ресурсов в типе соответственно.

В геологии и минералогии месторождения этого типа существенно отличаются от любых месторождений в карбонатитовых комплексах, что проявлено и в обсуждаемых в данном разделе характеристиках, всегда принимаемых во внимание при определении потребительской ценности руд (табл. 3). Прежде всего, обращает на себя внимание более низкое значение $C_{REO} = 0.7\%$ для типа в целом. Даже максимальные значения этого параметра у месторождений типа более чем вдвое уступают средним значениям C_{REO} для месторождений в карбонатитовых комплексах и корях их выветривания. Средняя по фоидному типу величина X_{PrNd} также ниже, но не столь значительно. Более того, колумбийский цикл, благодаря ресурсам месторождения Нечалачо, имеет этот параметр на уровне, который заметно превосходит среднее не только по фоидному, но и по двум типам в карбонатитах (табл. 3). Феномен Нечалачо может быть связан с двухэтапным формированием его руд, включающим этап интенсивного эпигенеза первичной магматогенной минерализации гидротермами из внешнего источника (Möller,

Williams-Jones, 2016), что принципиально отличается это месторождение от близких аналогов.

Особого внимания заслуживает как высокая доля тяжелых РЗЭ в месторождениях фоидного типа вообще ($X_{Y+} = 20.1\%$), так и лантаноидов этой группы в частности ($X_{LnY} = 7.9\%$). Внутри типа существует группа месторождений (Нечалачо, Норра-Черр, Танбрез, Кипава-Лэйк и Ловозерское РЗЭ-Zr), в которых главным концентратором РЗЭ является эвдиалит или метасоматически замещающий его полиминеральный агрегат. Величина X_{LnY} в них имеет диапазон 7.3–16.8% против 1.3–6.0% в остальных месторождениях данного типа. Их руды хорошо обогащаются и имеют очень низкие содержания радиоактивных элементов. Все это позволяет рассматривать месторождения с эвдиалитовыми рудами в качестве перспективного источника получения тяжелых РЗЭ, а также Pr и Nd ($X_{PrNd} = 13.7–24.3\%$), без избыточной доли других РЗЭ, имеющих и без того большое предложение на мировом рынке.

Месторождения этой группы есть в каждом из трех циклов, а колумбийский цикл представляют только такие объекты. Наиболее продвинутый среди них проект в плане готовности к освоению – это Нечалачо, а особенно его Базальное рудное тело, в котором сосредоточена почти половина ресурсов всего объекта со средними показателями $X_{LnY} = 9.7\%$ и $X_{PrNd} = 22.7\%$ при средних по всему месторождению 7.3 и 24.3 соответственно (Cuculescu et al., 2013). Другое месторождение этого цикла, Норра-Черр, значительно уступает Нечалачо по ресурсам и величине C_{REO} (фиг. 2) и пока менее детально разведано, но выделяется самыми высокими значениями по всему типу $X_{Y+} = 53.1\%$ и $X_{LnY} = 16.8\%$ (фиг. 4; табл. 3). Возможно, что причиной аномальности этих характеристик стала регенерация руд при динамометаморфизме вмещающего фоидного комплекса в конце мезопротерозоя (Sjöqvist et al., 2020). Самые же крупные ресурсы подобного типа (почти 80% от их суммы) оценены в месторождении Танбрез ($X_{PrNd} = 15.5\%$, $X_{Y+} = 31.2\%$ и $X_{LnY} = 11.8\%$) из родинийского цикла, что во многом предопределило лидирующую позицию этого цикла среди всех прочих циклов, как по сумме ресурсов, так и по среднему содержанию тяжелых РЗЭ.

Сиенитовый тип является самым малопродуктивным среди эндогенных месторождений в анализируемой выборке, причем 55% его ресурсов приходится на колумбийский цикл (табл. 3). Все сравниваемые показатели качества руд у этого типа являются рядовыми относительно типов, уже описанных выше. Он значительно уступает двум типам в карбонатитовых комплексах по величине C_{REO} и немного по X_{PrNd} , но превосходит их по X_{Y+}

и X_{LnY} . По отношению к фойдному типу значения C_{REO} и X_{PrNd} выше, а доли тяжелых РЗЭ ниже.

Среди отдельных месторождений по величине C_{REO} резко выделяется Чонджу из колумбийского цикла (2.66%). Однако данное значение из-за явной аномальности для своего типа всегда будет вызывать некоторые сомнения до тех пор, пока не появится в широком доступе детальное описание руд этого объекта. К категории объектов, заслуживающих особого упоминания в связи с высокими значениями X_{PrNd} , следует отнести только Азовское месторождение (23%) из колумбийского цикла, а по величине X_{Y+} и X_{LnY} – Пахарито-Маунтин из родинийского цикла (39 и 16.6% соответственно). Основу минерализации Пахарито-Маунтин составляет эвдиалит, чем легко объясняется сходство всех показателей качества его руд с соответствующими показателями у охарактеризованных выше месторождений фойдного типа с таким же главным минералом.

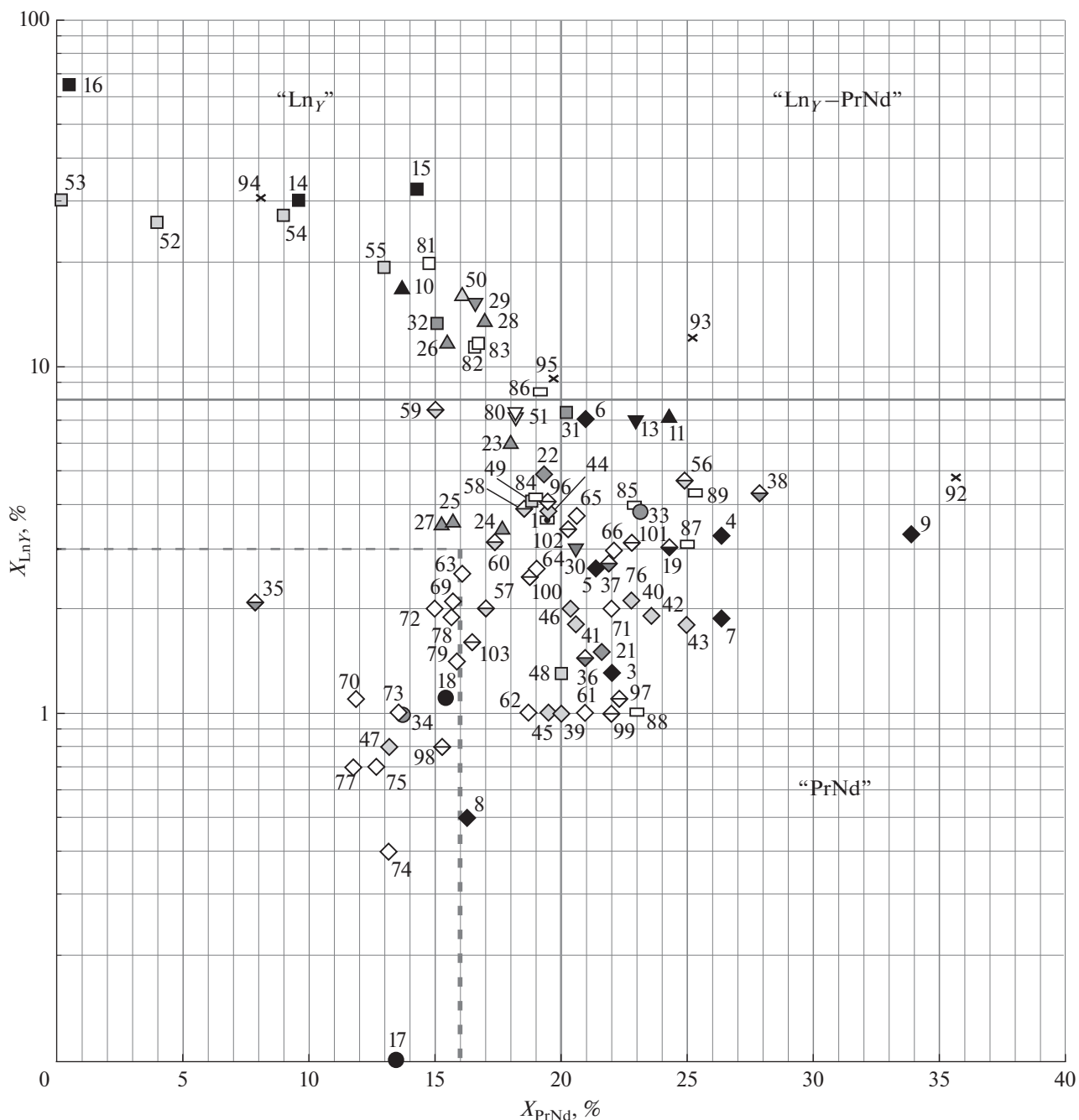
Щелочногранитный тип вдвое превосходит по сумме ресурсов сиенитовый, но его доля в общем балансе оцененных ресурсов все равно очень небольшая. Половина ресурсов связана с месторождениями родинийского цикла. Относительно других циклов в этом типе он выделяется максимальными значениями C_{REO} , но минимальными X_{Y+} и X_{LnY} (табл. 3). Однако даже эти самые низкие по типу значения X_{Y+} и X_{LnY} заметно выше их величины в любом другом типе, кроме некоторых месторождений ионно-адсорбционного типа. Максимальные значения X_{LnY} установлены в наиболее древних представителях типа, образовавшихся в колумбийском цикле (табл. 3, фиг. 4). К сожалению, эти месторождения среди самых бедных по общему содержанию РЗЭ – параметру, который и в других объектах данного типа очень невысокий. Это же касается и среднего значения X_{PrNd} , являющегося самым низким по выборке и в общем ряду всех месторождений типа, демонстрирующего отчетливую обратную зависимость с X_{LnY} (фиг. 4).

Другим общим свойством месторождений данного типа, которое в горной промышленности чаще всего рассматривается как недостаток, является большая комплексность руд и необходимость параллельного извлечения Zr, Nb, Ta, а иногда и других компонентов (табл. 2), что существенно усложняет технологии переработки руд. Кроме того, большинство таких месторождений имеет повышенное содержание радиоактивных элементов, а в некоторых из них (Гурая, Джебел-Сайид) концентрации U рассматриваются как потенциально промышленные. Это обстоятельство дает соответствующее экологическое обременение при их возможной эксплуатации. Наименее радиоактивные руды установлены в месторождениях родинийского и амазийского циклов.

Субщелочногранитный тип – самый малочисленный: по два месторождения в колумбийском и родинийском циклах (табл. 2, табл. 3). При этом он занимает четвертое место по общему количеству ресурсов. В этом “повинен” исключительно Cu–Au–U–Ag гигант Олимпик-Дэм, послуживший главным прототипом для выделения железоксидного медь-золоторудного типа месторождений. Огромные ресурсы РЗЭ (43.7 млн т РЗО) сосредоточены практически в тех же контурах, что и добываемые сульфидные руды, но при обогащении вся редкоземельная минерализация уходит в хвосты. Такое положение вещей объясняется низкими содержаниями РЗЭ ($C_{REO} = 0.42\%$) при относительно малых долях наиболее ценных РЗЭ ($X_{PrNd} = 15.4\%$, $X_{LnY} = 1.1\%$) и высокой дисперсности минералов-концентраторов (<50 мкм), что пока делает их извлечение нерентабельным (Ehrig et al., 2012).

В большинстве других объектов типа значения X_{PrNd} и X_{LnY} также низкие с самой малой их величиной в рудах месторождения Мэри-Кэтлин: 13.5% и рекордно низкие для всей выборки 0.1% соответственно (табл. 3; фиг. 4). Только самое небольшое по общим ресурсам месторождение Стенкамп-скрал с $X_{PrNd} = 23.1\%$ и $X_{LnY} = 3.8\%$ выбивается из этого ряда. В совокупности с аномально высоким суммарным содержанием РЗО (фиг. 2) это делает данное месторождение очень вероятным кандидатом на возобновление эксплуатации для получения РЗЭ в ближайшие годы (Harmer, Nex, 2016). Не считаются для этого препятствием, согласно имеющемуся проекту, даже издержки, связанные с высокой радиоактивностью главного минерала его руд монацита (7.9–8.6% ThO₂ и 0.08% U₃O₈ по Andreoli et al., 2014), которая в этом минерале на близком уровне зафиксирована только еще в некоторых россыпных месторождениях анализируемой выборки.

Россыпной тип является заведомо недооцененным по количеству ресурсов из-за уже описанной ториевой проблемы. Если бы ее не существовало, то вне всяких сомнений, его доля в суммарных ресурсах всей выборки, и особенно в ресурсах амазийского цикла, была бы более существенной, как роль в промышленном производстве РЗЭ. Со стороны других параметров качества минерального сырья этот тип месторождений вполне конкурентен, что особенно хорошо видно по показателям X_{PrNd} и X_{LnY} , которые в россыпных месторождениях в среднем даже выше, чем указано для руд в карбонатитах и корах их выветривания, включая и уже эксплуатируемые месторождения этих типов (табл. 3, фиг. 4). Россыпи с повышенным содержанием ксенотима, как например, Чарли-Крик и ВИМ-150, могут обеспечить еще более высокий, чем средний по типу, выход тяже-



Фиг. 4. Относительные доли наиболее дорогостоящих легких (Pr + Nd) и тяжелых (LnY) лантаноидов в рудах месторождений выборки. Ось X_{LnY} имеет логарифмическую шкалу. Нумерация месторождений и условные обозначения аналогичны фиг. 2. Остальные пояснения даны в тексте.

лых лантаноидов, сопоставимый с рудами фойд-ного типа (табл. 3, фиг. 4).

Низкие значения C_{REO} в россыпных месторождениях амазийского цикла (табл. 3, фиг. 2) не являются большим недостатком ввиду относительной простоты обогащения нелигифицированных песков. Для модифицированных россыпей кенорско-

го цикла этот недостаток компенсирует высокая стоимость их главного компонента — урана.

Ионно-адсорбционный тип также характеризуется низкими значениями C_{REO} . Но и в данном случае это не является существенным недостатком ввиду очень дешевой технологии извлечения РЗЭ из недр — настолько дешевой, что рентабель-

но эксплуатировать даже очень мелкие месторождения, которых на территории Китая выявлено уже несколько сотен, и обрабатываются они в основном небольшими артелями (Xie et al., 2016; Wang et al., 2018). Однако проводимое ужесточение экологического законодательства Китая для этого вида деятельности должно сместить фокус интереса к относительно крупным проектам, где дополнительные стоимостные издержки при добыче РЗЭ, возникающие из-за новых природоохранных ограничений, будет легче компенсировать (Wang et al., 2018).

Таких достаточно крупных объектов на настоящий момент известно четыре, и они составляют дискретный ряд от объекта с самой большой по выборке величиной $X_{PrNd} = 35.6\%$ при умеренно низком значении $X_{LnY} = 4.8\%$ (Сюньву) до объекта с очень большой величиной $X_{LnY} = 30.6\%$ при небольшом параметре $X_{PrNd} = 8.1\%$ (Лоннань). В результате этот тип демонстрирует максимальный среди всех типов разброс значений X_{PrNd} и один из самых больших разбросов значений X_{LnY} (табл. 3; фиг. 4). Причем даже минимальное по типу значение X_{LnY} выше, чем у более половины объектов выборки (фиг. 4).

Такие большие амплитуды имеют три потенциальные причины. Во-первых, специализация данного типа месторождений по РЗЭ зависит от подвергнутого выветриванию субстрата — его геохимическая специализация по РЗЭ в принципиальных чертах наследуется латеритной корой (Li et al., 2017; Pinto-Ward, 2017; Ram et al., 2019). Во-вторых, месторождения данного типа всегда имеют отрицательную аномалию церия, т.к. значительная доля последнего окисляется в верхних частях коры выветривания до четырехвалентного состояния и связывается, как и торий, в минералах типа церианита (Borst et al., 2020). В результате значительно увеличиваются доли других РЗЭ. Относительное уменьшение доли церия рассматривается как положительная черта ионных глин в силу и без того избыточного предложения этого элемента на рынке РЗЭ. В-третьих, существует тенденция к более длительной миграции иттриевых РЗЭ в корах выветривания, что приводит к относительному обогащению верхней части минерализованных зон рассматриваемого типа легкими РЗЭ (кроме церия), а нижней части — тяжелыми (Borst et al., 2020). В зависимости от длительности формирования коры выветривания степень этого разделения может меняться, что может сказаться и на характеристиках оконтуриваемой по данным геологоразведочных работ эксплуатационной зоны.

ОБСУЖДЕНИЕ ДАННЫХ

Геохронологические особенности распространения типов месторождений

Представленные в настоящем исследовании данные однозначно указывают на большую неравномерность формирования выявленных месторождений РЗЭ с оцененными ресурсами, которые представляют промышленный интерес в настоящее время или могут получить такой статус в обозримой перспективе. Причем в самом раннем суперконтинентальном цикле, кенорском, РЗЭ вообще не имеют ни крупных, ни мелких месторождений, в которых они представляли бы главный интерес для добычи. В архее и раннем палеопротерозое единичны даже те месторождения любого масштаба, где РЗЭ — потенциальный попутный компонент Zr или U.

Тем не менее, как минимум еще один аналог рудного поля Эллиот-Лэйк, причем не меньших масштабов, вероятно, все же существует — это метаконгломераты бассейна Витватерсранд (кратон Каапваль) с общеизвестными грандиозными ресурсами золота и урана. В геологическом и металлогеническом аспектах метаконгломераты бассейнов Гурон и Витватерсранд однотипны, но последние на 0.3–0.5 млрд лет древнее, и они никогда не оценивались в качестве возможного промышленного источника РЗЭ. При этом аналитические данные по геохимии и минералогии метаконгломератов Верхнего Доминион-Рифа в нижней части разреза бассейна Витватерсранд (Duhamel, 2010) указывают на большую вероятность того, что они могут в не меньшей степени, чем их аналоги в Гуронском бассейне, представлять интерес не только как урановые, но и как редкоземельные руды. Впрочем, реальность этого предположения могут подтвердить только геологоразведочные работы.

У месторождений в палеороссыпях кенорского цикла нет полных аналогов в более поздних эпохах. Условия осадконакопления, изменившиеся в результате Великого Оксигенационного События (2.31–2.43 млрд лет), привели, начиная с этого периода и вплоть до настоящего времени, к отсутствию длительно сохраняющихся детритных минералов урана в терригенных породах (Holland, 2006). Вместе с минералами РЗЭ повышенные концентрации в них обычно имеют минералы Ti и Zr. Такие безурановые аккумуляции тяжелых детритных минералов представляют практический интерес исключительно в нелиффицированном состоянии, которое в отложениях древнее позднего мела практически не встречается. Поэтому только молодые россыпи и нашли место в анализируемой выборке.

Если сравнивать с другими редкими элементами, массово используемыми современной промышленностью, то следует обратить внимание на

тот факт, что кенорский цикл, как и в случае РЗЭ, исключительно малозначим в металлогении Nb (Ткачев и др., 2020), но является одним из важнейших в металлогении Ta и Li (Ткачев и др., 2019₂; Tkachev et al., 2018). В металлогении Ta и Li большую роль играют эндогенные месторождения внутрикорового происхождения – гранитные пегматиты и плюмазитовые редкометалльные граниты. Все их месторождения кенорского цикла принадлежат только к пегматитовому типу. В эндогенной металлогении РЗЭ и Nb внутрикоровые магматические формации демонстрируют значимую продуктивность исключительно редко, и принципиальное значение имеют только магматические формации с решающим вкладом мантийных источников вещества: карбонатиты, фойидные и бесфойидные сиениты, щелочные граниты. Несмотря на то что их проявления известны уже с неогархея, свой рудоносный потенциал в отношении редких элементов они, как показывают это и предыдущие наши исследования, начали значимо реализовывать только с середины палеопротерозоя (Ткачев и др., 2019₂; Ткачев и др., 2020). Вероятно, это связано с необходимостью создания определенного уровня метасоматизации значительных объемов литосферной мантии в результате накопительного эффекта от коро-мантийного взаимодействия в нижних частях субдукционных зон (Коваленко и др., 2006; Когарко, 2006).

Достаточные объемы соответствующим образом метасоматизированной мантии, по-видимому, сформировались только к середине палеопротерозоя. Именно с этого времени возникавшие там магмы, пройдя по пути вверх необходимую дифференциацию, стали концентрировать в конечных камерах своей кристаллизации достаточное количество РЗЭ (\pm Nb, Zr, Ta, P, U и т.д.), тем самым создавая предпосылки для формирования месторождений гипогенных типов, рассмотренных в нашем исследовании.

Эти события, даже в глобальном масштабе, не происходили перманентно: на всем протяжении геологической истории Земли они имели пульсирующий характер, который в принципе присущ магматизму мантийного происхождения (Балашов, Глазнев, 2006; Белов и др., 2008; Когарко, 2006; Ernst, 2014). Притом, что практически все комплексы щелочных пород имеют геохимическую специализацию на литофильные редкие металлы, включая и РЗЭ, рудные концентрации содержат только некоторые из них. Поэтому импульсный характер распределения месторождений РЗЭ на оси геологического времени, продемонстрированный авторами (фиг. 3), необходимо воспринимать как вполне естественное следствие описанной совокупности причин.

Вместе с тем, некоторые явления, вырисовывающиеся из представленных здесь металлогени-

ческих данных, хорошо коррелируются с глобальными данными по интенсивности щелочного магматизма. В частности, если не брать в расчет месторождения самого малочисленного субщелочного типа, материнскими для которых были магмы, выплавленные, по-видимому, из более древних внутрикоровых пород (Basson et al., 2016; Ehrig et al., 2012; Ngo et al., 2020; Oliver et al., 1999), то в распределении всех остальных типов, генетически связанных с магматическими комплексами, присутствуют два больших временных разрыва на оси геологического времени в интервалах 1.55–1.75 и 0.7–1.0 млрд лет (фиг. 3). Эти разрывы совпадают с глобальными минимумами интенсивности щелочного, включая карбонатиты, магматизма (Балашов, Глазнев, 2006; Когарко, 2006).

Имеющиеся геохронологические обобщения по щелочному магматизму указывают на его варьирующую, но в целом нарастающую, интенсивность во всех петрохимических сегментах от щелочных гранитов до фойидных сиенитов и карбонатитов (Балашов, Глазнев, 2006; Белов и др., 2008; Когарко, 2006; Коваленко и др., 2006). В металлогенических данных полной корреляции с этой тенденцией не обнаруживается. Согласно этому нашему исследованию, а также ранее опубликованным данным по металлогении Nb (Ткачев и др., 2020), такая тенденция четко проявлена только для месторождений, связанных с карбонатитовыми комплексами: частота формирования среди них рудоносных объектов с течением геологического времени действительно увеличивается (табл. 3; фиг. 3б, в). Вместе с тем, по количеству ресурсов, сосредоточенных в карбонатитовых комплексах, лидирует родинийский цикл. Принципиального противоречия общей тенденции здесь нет: ситуация обусловлена существованием такого уникального объекта, как Баянь-Обо, который следует рассматривать как аномалию с ураганым значением. Подобные аномалии возникают в природе из-за незакономерного, но реально возможного, наложения целого ряда факторов.

Остальные типы месторождений в щелочных комплексах, т.е. вне связи с карбонатитами, такой тенденции к росту с течением геологического времени не проявляют, а у сиенитового и, особенно, фойидного типов тенденция скорее обратная. Причина этого пока не вполне понятна. Возможно, имеет значение меньший уровень эрозивного среза у комплексов фанерозойского возраста и, особенно, у возникших в амазийском цикле: большинство месторождений РЗЭ сиенитового и все фойидного типа локализованы в абиссальных комплексах, в т.ч. расслоенных, тяготеющих к внутриплатформенным областям, которые крайне медленно эродируются.

Для установленного в данном исследовании факта формирования месторождений РЗЭ субще-

лочногранитного типа только в мезопротерозое и раннем неопротерозое также пока нет явного объяснения. Не исключено, что этот тип просто мало привлекает горнодобывающие и геологоразведочные компании из-за невысоких параметров качества сырья, наблюдаемых в большинстве его представителей (фиг. 4). В пользу этого свидетельствует и тот факт, что все имеющиеся в выборке объекты данного типа изначально выявлены как носители совсем других полезных ископаемых, и только впоследствии и с разной степенью интереса было обращено внимание на их редкоземельный потенциал.

Особенности руд РЗЭ в зависимости от типа и возраста месторождений

Фактор качества руд РЗЭ достаточно важен для определения промышленных перспектив любого месторождения, и он многоаспектен: валовое содержание и спектр РЗЭ, состав минералов-концентраторов, возможность их предварительного концентрирования, радиоактивность руд, доля в сумме РЗЭ наиболее ликвидных и дорогих на рынке элементов — Pr, Nd и Ln_γ. В имеющихся глобальных обобщениях на эту тему корреляция последнего из этих аспектов с типовой принадлежностью месторождений на количественной основе никем не рассматривалась. Поэтому именно на нем считаем необходимым сосредоточиться в завершение обсуждения представленной в статье информации.

Описанные выше в нашем исследовании данные показали очень широкий спектр соотношений параметров X_{PrNd} и $X_{Ln\gamma}$ в известных месторождениях (табл. 3, фиг. 4). В публикациях и технических докладах по результатам геологоразведочных работ часто используется термин “специализация руд” на те или иные группы РЗЭ. При этом общепринятых количественных критериев такой классификации пока не существует. Проанализировав все доступные документы подобного рода в том аспекте, какие именно группы РЗЭ в каждом конкретном месторождении рассматриваются как наиболее ценные для его эксплуатации в настоящем или планируемом будущем, авторы своей экспертной оценкой в конечном итоге определили, что значения 8% для $X_{Ln\gamma}$ и 20% для X_{PrNd} могут рассматриваться в качестве граничных для выделения месторождений, чьи руды необходимо считать специализированными на тяжелые лантаноиды и празеодим—неодим соответственно.

На диаграмме, построенной в соответствующих координатах (фиг. 4), две прямые, проведенные по этим значениям, разделили все поле на четыре сектора, которые для краткости изложения названы как “Ln_γ” (левый верхний), “Ln_γ—PrNd” (правый верхний), “PrNd” (правый нижний) и

“неспециализированный” (левый нижний). Внутри последнего сектора выделена область с верхними значениями $X_{PrNd} = 16\%$ и $X_{Ln\gamma} = 3\%$, названная нами “очень бедной”, подразумевая обедненность соответствующих месторождений только наиболее дорогостоящими РЗЭ.

Сектор “Ln_γ” вмещает точки, которые характеризуют руды, специализированные на тяжелые лантаноиды, но относительно бедные Pr и Nd. Это единственное поле диаграммы, где без специальных математических манипуляций отчетливо виден тренд обратной пропорциональности значений X_{PrNd} и $X_{Ln\gamma}$. В сектор попали почти все объекты щелочногранитного типа, кроме месторождения Фокстрот, оказавшегося в секторе “PrNd”, но предельно близко к точке сопряжения с сектором “Ln_γ”. Верхняя часть последнего, т.е. область для точек, указывающих на максимальную долю тяжелых лантаноидов, оказалась “заселена” представителями щелочногранитного типа, причем только из колумбийского и пангейского циклов. Их аналоги из родинийского и амазийского циклов заняли нижнюю часть рассматриваемого сектора.

Здесь же локализованы почти все месторождения с рудами на основе минералов группы эвдиалита из фойидного и сиенитового типов. Из таких месторождений в этот сектор не попали только два. Точка одного из них, Тунги, находится сразу за линией раздела в “неспециализированном” секторе. От всех других месторождений с доминированием в рудах минералов группы эвдиалита его отличает, прежде всего, небольшая глубина формирования: кристаллизация материнского комплекса происходила не в абиссальных, а в субвулканических условиях. Кроме того, часть РЗЭ связана с гидротермальными карбонатами (бастнезит и т.п.), которые наложены на первичную ортомагматическую минерализацию (Spandler, Morris, 2016). Второе “исключение” — месторождение Нечалачо, в котором первичным минералом руд также был эвдиалит, позднее практически полностью метасоматически замещенный полиминеральным агрегатом. Этот объект попал в сектор “PrNd”, но близко к его верхней границе и на явном продолжении тренда размещения месторождений-аналогов в секторе “Ln_γ” (фиг. 4). Такое смещение объекта относительно своих прямых аналогов, возможно, свидетельствует об изменении баланса рудных элементов, возникшем под воздействием гидротермальных растворов из внешних источников (Möller, Williams-Jones, 2016).

В секторе “Ln_γ” также находятся два представителя ионно-адсорбционного типа (Лоннань и Танталус) и одно месторождение россыпного типа (Чарли-Крик). Наличие последнего в этом секторе объясняется повышенным содержанием

ксенотима относительно обычного для такого типа месторождений уровня.

На данный момент из всех месторождений сектора “Ln_γ” эксплуатируется только Лоннань. Освоение еще 2–3 месторождений из этой группы – один из возможных вариантов для решения проблемы снабжения рынка некоторыми тяжелыми лантаноидами.

Сектор “Ln_γ–PrNd” содержит только одну точку, что указывает на чрезвычайную, как минимум, редкость руд с соответствующим сочетанием РЗЭ. Точка принадлежит “ионным глинам” месторождения Серра-Верде, которое по соотношению X_{PrNd} и $X_{Ln\gamma}$ является самым привлекательным в современной сырьевой базе мира, т.к. наиболее гармонично соответствует спросу на все дорогостоящие РЗЭ. Тем не менее, сведений о начале его промышленной эксплуатации еще не было, хотя детальная разведка завершилась более 5 лет назад.

В секторе “PrNd” большинство составляют точки месторождений в карбонатитовых комплексах в основном с гипогенными рудами. Обращает на себя внимание тот факт, что в суперконтинентальных циклах, по мере уменьшения их возраста, существует тенденция к снижению доли числа месторождений карбонатитового типа с рудами, специализированными на Pr–Nd: 6 из 7 в колумбийском, 1 из 2 в родинийском, 6 из 9 в пангейском и 5 из 17 в амазийском или 0.71, 0.50, 0.67 и 0.29 соответственно. Эта тенденция становится особенно отчетливой, если учесть тот факт, что среди всех карбонатитовых месторождений все три месторождения с особенно высокими значениями X_{PrNd} (Янгибана, Селигдар и Ноланс-Бор с 33.9, 26.4 и 26.4% соответственно) принадлежат колумбийскому циклу, а в “очень бедную” область соседнего “неспециализированного” сектора попало 10 из 19 карбонатитовых месторождений амазийского цикла (фиг. 4). Возможно, этот тренд отражает наличие каких-то объективных геоисторических изменений в балансе РЗЭ при генерировании карбонатитовых магм в мантии, или в условиях их дифференциации по мере продвижения к дневной поверхности.

Для месторождений с гипергенными рудами в карбонатитах аналогичная тенденция не выражена. Однако в таких объектах первичные соотношения элементов в рудах могут быть существенно изменены из-за дифференцированного поведения отдельных РЗЭ при формировании и эпигенезе рудоносных кор выветривания карбонатитов (Лапин, Толстов, 1991; Лапин и др., 2011; Borst et al., 2020). Точки, характеризующие данный тип, разделились между секторами “PrNd” и “неспециализированным” приблизительно пополам, и только у месторождений пангейского цикла отчетливо проявлено тяготение к “неспециализированному”

сектору (фиг. 4). Там же разместились точки всех объектов фойдитного типа с рудами не на основе эвдиалита, а также все, кроме одного, представители субщелочногранитного типа. Причем последние попали в “очень бедную” область сектора. Только месторождение Стенкампскрал в этом типе имеет Pr–Nd специализацию, и оно единственное среди них образовалось в связи с позднеорогенным магматизмом в зоне гранулитового метаморфизма высокоградиентного типа. Можно предположить, что только в таких экстремально метаморфизованных частях земной коры возможно образование внутрикоровых субщелочных гранитных магм, способных генерировать руды РЗЭ с Pr–Nd специализацией, но обладающих и высокой торииеносностью.

В сектор “PrNd” также попало большинство точек россыпных месторождений. Во всех из них монацит – единственный или резко доминирующий концентратор РЗЭ. В двух месторождениях россыпного типа, которые попали в “неспециализированный” сектор, монацит является или одним из нескольких количественно сопоставимых концентраторов РЗЭ (Эллиот-Лэйк), или даже отсутствует в их списке (Аксу-Диамас).

Месторождение Сюньву – единственный представитель “ионных глин” в секторе “PrNd”, причем у него крайняя для всей выборки степень выражения Pr–Nd-специализации (фиг. 4). Оно закономерно заканчивает весь ряд объектов данного типа в нашем исследовании, т.к. все они имеют разную, но очень отчетливо выраженную специализацию по наиболее дорогостоящим РЗЭ. В целом все это находит четкое выражение в средне-взвешенных значениях соответствующих числовых характеристик для типа в целом: X_{PrNd} данного типа – максимальное среди всех типов, а $X_{Ln\gamma}$ уступает только щелочногранитному типу (табл. 3).

Кроме ионно-адсорбционного типа, только щелочногранитный тип, как было показано выше, также не имеет ни одного представителя в “неспециализированном” секторе. Однако руды в щелочных гранитах, при всех их достоинствах, связанных с большой долей Ln_γ в составе РЗЭ, пока мало, в отличие от “ионных глин”, привлекают горную промышленность из-за намного более массивного комплекса технологических, инфраструктурных и экологических проблем при их эксплуатации. Если учитывать высокий спрос на международном рынке не только на Ln_γ, но также на Pr и Nd, то только месторождения Стрэндж-Лэйк и Фокстрот, представляющие родинийский цикл, являются в щелочногранитном типе объектами с наиболее удачным соотношением X_{PrNd} и $X_{Ln\gamma}$ (фиг. 4). Даже несмотря на то, что установленные в них значения $X_{Ln\gamma}$ в своем типе минимальные, они все-таки высокие на фоне всей остальной анализируемой выборки. При этом они сочетают-

ся с высокими для типа значениями C_{REO} , а также с более низкой радиоактивностью руд, чем у большинства их аналогов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Металлогения РЗЭ имеет достаточно позднее начало в геологической летописи нашей планеты — намного более позднее, чем у большинства других широко используемых промышленностью редких элементов. В кенорском суперконтинентальном цикле вообще не известно месторождений, в которых РЗЭ представляли бы главный экономический интерес. В эндогенных комплексах этого этапа геологического развития Земли установлены очень небольшие, бедные по содержаниям и при этом исключительно редкие аккумуляции РЗЭ в рудах циркония, имеющих возраст не древнее позднего неогарха. В экзогенных формациях кенорского цикла анализируемый нами вид минерального сырья получил ресурсную оценку, превышающую установленный для анализируемой выборки лимит в 100 тыс. т РЗЭ, только в единственном месторождении раннепалеопротерозойского возраста, являющемся представителем ураноносных модифицированных палеороссыпей.

Месторождения, в рудах которых РЗЭ представляют основную практическую ценность, известны только начиная с колумбийского цикла и выявлены во всех более поздних циклах. Параллельно увеличилось количество и масштабы месторождений, в которых РЗЭ выступают в качестве важнейшего попутного вида минерального сырья для основного компонента руд (Nb, Zr, P и т.п.). Во всех четырех наиболее продуктивных на РЗЭ суперконтинентальных циклах (от колумбийского до амазийского) своих представителей имеют карбонатитовый, гипергенный в карбонатитах, сиенитовый и щелочногранитный типы месторождений. Фоидный тип представлен в колумбийском, родинийском и пангейском циклах, субщелочногранитный — в колумбийском и родинийском, а россыпной и ионно-адсорбционный — в амазийском. На оси геологического времени месторождения всех типов распределены очень неравномерно.

Карбонатитовый тип в металлогении РЗЭ является самым многообъектным в проанализированной выборке и составляет половину всех ресурсов в ней. Для типа в целом характерны высокие средневзвешенные значения C_{REO} и X_{PrNd} , но низкие $X_{\text{Y+}}$ и X_{LnY} . При этом существует тенденция к уменьшению доли месторождений с $X_{\text{PrNd}} \geq 20\%$ от колумбийского цикла к амазийскому вплоть до появления в последнем месторождений, попадающих в число наиболее бедных по этому параметру объектов. Частота образования месторождений имеет отчетливую тенденцию к увеличению

от раннего докембрия к кайнозою. Это хорошо коррелируется с общей тенденцией к интенсификации данного типа магматизма в земной коре в геологической истории.

Тип гипергенных месторождений в карбонатитах — второй по количеству месторождений и ресурсов РЗЭ. Его средневзвешенные характеристики руд принципиально схожи с собственно карбонатитовым типом с небольшими вариациями, но без эволюционной тенденции уменьшения X_{PrNd} . У этих двух типов также идентична и тенденция в изменении количества объектов при переходе от более ранних суперконтинентальных циклов к более поздним.

Совокупные ресурсы фоидного типа количественно сопоставимы с ресурсами гипергенного типа в карбонатитах, но отличаются от них намного меньшей величиной C_{REO} и несколько уступают им в величине X_{PrNd} , одновременно превосходя их значительно по уровню значений $X_{\text{Y+}}$ и X_{LnY} . В фоидном типе последние характеристики максимальны у месторождений с эвдиалитовыми рудами.

Сиенитовый тип имеет самое малое количество ресурсов РЗЭ по всей выборке. Числовые значения рассмотренных параметров качества руд для объектов этого типа находятся в промежутке между соответствующими параметрами карбонатитового и фоидного типов, но ближе к последнему. Наиболее сходны по параметрам сравнения эвдиалитовые руды из двух типов, но в сиенитовом типе такие руды встречаются реже.

Для месторождений щелочногранитного типа обычны низкие значения C_{REO} при маленькой величине X_{PrNd} . Вместе с тем, эти же руды характеризуются самыми большими величинами $X_{\text{Y+}}$ и X_{LnY} по всей выборке. Особенно высоки их значения в месторождениях колумбийского и пангейского циклов. С другой стороны, эти месторождения имеют высокую комплексность и повышенную радиоактивность руд (U—Th), что, несмотря на высокую удельную стоимость каждой тонны ресурсов, очень сильно снижает к ним практический интерес.

Субщелочногранитный тип наименее выразителен в числовых показателях качества руд. Все его месторождения, за единственным исключением, имеют очень низкие, вплоть до крайне низких, значения X_{PrNd} , $X_{\text{Y+}}$ и X_{LnY} .

Для месторождений россыпного типа характерны повышенные значения X_{PrNd} , а в некоторых случаях, когда доля ксенотима среди тяжелых минералов больше обычной, то и величина X_{LnY} может вызвать соответствующий практический интерес. Тем не менее, большие экологические издержки, связанные с высокой ториеносностью монацита россыпей, препятствуют более широкому освоению месторождений данного типа в

мире и заставляют в большинстве случаев игнорировать их редкоземельный потенциал не только при добыче, но и при проведении геологоразведочных работ.

Ионно-адсорбционный тип характеризуется самыми низкими значениями C_{REO} и редко создает крупные аккумуляции РЗЭ. При этом они всегда демонстрируют отчетливую специализацию, как минимум, по одной из наиболее дорогостоящих на рынке групп РЗЭ. В совокупности с простотой технологии добычи это позволяет данному типу играть в производстве РЗЭ намного более значительную роль, чем в сырьевой базе.

У некоторых типов месторождений наблюдаются эволюционные тенденции в вариациях X_{PrNd} , $X_{\text{Y+}}$ и X_{LnY} , но вследствие того, что в каждом из суперконтинентальных циклов, кроме кенорского, формировались месторождения сразу нескольких металлогенических типов (от 4 до 6), то каких-то ярко выраженных тенденций в специализации отдельных циклов на определенные группы РЗЭ выявить не удалось.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы глубоко признательны двум анонимным рецензентам за внимательное прочтение рукописи статьи и сделанные замечания и рекомендации. Они были максимально учтены при создании финальной версии статьи, что способствовало несомненному росту качества изложения результатов нашего исследования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта № 0140-2019-0005 государственных работ в ФГБУН Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН (ГГМ РАН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Архангельская В.В., Лагонский Н.Н., Усова Т.Ю., Чистов Л.Б. Руды редкоземельных металлов России. М.: ВИМС. 2006. 72 с.
- Афанасьев Б.В. Минеральные ресурсы щелочно-ультраосновных массивов Кольского полуострова. СПб: Изд-во "Роза ветров", 2011.
- Балашов Ю.А., Глазнев В.Н. Циклы щелочного магматизма // Геохимия. 2006. № 3. С. 309–321.
- Белов С.В., Лапин А.В., Толстов А.В., Фролов А.А. Минералогия платформенного магматизма (траппы, карбонатиты, кимберлиты). Новосибирск: изд-во СО РАН. 2008. 537 с.
- Быховский Л.З., Архангельская В.В., Тигунов Л.П., Ануфриева С.И. Перспективы освоения минерально-сырьевой базы и развития производства скандия в России и других странах СНГ // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2007. № 5. С. 27–32.
- Владыкин Н.В., Котов А.Б., Борисенко А.С., Ярмолюк В.В., Похиленко Н.П., Сальникова Е.Б., Травин А.В., Яковлева С.З. Возрастные рубежи формирования щелочно-ультраосновного массива Томтор: результаты геохронологических U–Pb и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ исследований // ДАН. 2014. Т. 454. № 2. С. 195–199.
- Гурский Д.С., Есипчук К.Ю., Калинин В.И., Кулиш Е.А., Нечаев С.В., Третьяков Ю.И., Шумлянский В.А. Металлические и неметаллические полезные ископаемые Украины. Т. 1: Металлические полезные ископаемые. Киев-Львов, изд-во "Центр Европы". 2005. 785 с.
- Зозуля Д.Р., Лялина Л.М., Савченко Е.Э. Бритолитовые руды Zr–Y–REE месторождения Сахарйок (Кольский полуостров): геохимия, минералогия и стадийность образования // Геохимия. 2015. № 10. С. 913–924.
- Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Ковач В.П., Сальникова Е.Б., Козловский А.М., Котов А.Б., Ханчук А.И. Вариации источников магм щелочных гранитоидов и связанных с ними пород Халдзан-Бурегтейской группы массивов (Западная Монголия) по изотопным (неодим, стронций и кислород) и геохимическим данным // Петрология. 2004. Т. 12. № 6. С. 563–585.
- Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Андреева И.А., Ашихмина Н.А., Козловский А.М., Кудряшова Е.А., Кузнецов В.А., Листратова Е.Н., Лыхин Д.А., Никифоров А.В. Типы магм и их источники в истории Земли. Ч. 2. Редкометальный магматизм: ассоциации пород, состав и источники магм, геодинамические обстановки формирования. М.: ИГЕМ РАН, 2006. 280 с.
- Когарко Л.Н. Щелочной магматизм и обогащенные мантийные резервуары. Механизмы возникновения, время появления и глубины формирования // Геохимия. 2006. № 1. С. 5–13.
- Лапин А.В., Толстов А.В. Окислительный и восстановительный этапы формирования зоны гипергенеза карбонатитов и их рудоносность // Геология руд. месторождений. 1991. Т. 33. № 4. С. 81–91.
- Лапин А.В., Толстов А.В., Плошко В.В., Чемизова Л.Н., Сорокина Т.И. Минералогия кор выветривания карбонатитов. М.: ГЕОС, 2011. 308 с.
- Лебедев Н.И. Минерально-сырьевые ресурсы Тувы: краткая характеристика месторождений полезных ископаемых. М.: "Академия Естествознания", 2013. 408 с.
- Лихникевич Е.Г., Ожогина Е.Г., Фатов А.С. Минералогические критерии выбора технологии переработки руд редких металлов // Вестник ИГ Коми НЦ УРО РАН. 2019. № 4. С. 42–48. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2019-4-42-48>
- Ломаев В.Г., Сердюк С.С. Чуктуконское месторождение ниобий-редкоземельных руд – приоритетный объект для модернизации редкометалльной промышленности России // Журнал Сибирского Федерального Университета. Серия: Техника и технологии. 2011. Т. 4. № 2. С. 132–154.
- Никифоров А.В., Öztürk H., Altuncu S., Лебедев В.А. Рудоносный карбонатит-содержащий комплекс Кызылджарен: время формирования и минеральный состав пород (Северо-Западная Анатолия, Турция) // Геология руд. месторождений. 2014. Т. 56. № 1. С. 41–69.

- Плюснин Г.С., Коляго Е.К., Пахольченко Ю.А., Калмычкова Т.Н., Сандимирова Г.П. Rb-Sr-возраст и генезис Кийского щелочного массива (Енисейский край) // Докл. АН СССР. 1989. Т. 305. № 4. С. 956–960.
- Родионов Н.В., Лепехина Е.Н., Антонов А.В., Капитонов И.Н., Балашова Ю.С., Беляцкий Б.В., Арзамасцев А.А., Сергеев С.А. U-Pb SHRIMP-II возраст титанита и время образования апатит-нефелиновой минерализации Хибинского и Ловозерского щелочных массивов (Кольский полуостров) // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 8. С. 1195–1210.
- Рундквист Д.В., Ткачев А.В., Черкасов С.В. и др. Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. Т.1. Глобальные закономерности размещения. М.: ИГЕМ РАН, 2006.
- Сальникова Е.Б., Яковлева С.З., Никифоров А.В., Котов А.Б., Ярмолук В.В., Анисимова И.В., Сугоракова А.М., Плоткина Ю.В. Бастнезит – перспективный минерал-геохронометр для U–Pb геохронологических исследований // ДАН. 2010. Т. 430. № 3. С. 386–388.
- Ткачев А.В., Рундквист Д.В. Глобальные тенденции в эволюции металлогенических процессов как отражение суперконтинентальной цикличности // Геология руд. месторождений. 2016. Т. 58. № 4. С. 295–318.
- Ткачев А.В., Рундквист Д.В., Вишневская Н.А. Сопоставление суперконтинентальных циклов в металлогении редкоземельных элементов // ДАН. 2018. Т. 480. № 6. С. 698–702.
- Ткачев А.В., Булов С.В., Чесалова Е.И. Геопортал “Металлогения” // Геоинформатика. 2019₁. № 1. С. 2–11.
- Ткачев А.В., Рундквист Д.В., Вишневская Н.А. Глобальная металлогения тантала в геологическом времени // Геология руд. месторождений. 2019₂. Т. 61. № 6. С. 19–37.
- Ткачев А.В., Рундквист Д.В., Вишневская Н.А. Сравнение суперконтинентальных циклов в металлогении ниобия // Геология руд. месторождений. 2020. Т. 62. № 1. С. 55–75.
- Фролов А.А., Толстов А.В., Белов С.В. Карбонатитовые месторождения России. М.: ИИА-Природа, 2003. 494 с.
- Чеботарев Д.А. Петрогенезис и ниобий-редкоземельная минерализация Чукотского щелочного ультраосновного карбонатитового массива, запад Сибирской платформы. Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: 2020. 134 с.
- Шеремет Е.М., Мельников В.С., Стрекозов С.Н., Козар Н.А., Возняк Д.К. Азовское редкометальное месторождение Приазовского мегаблока Украинского щита (геология, минералогия, геохимия, генезис, проблемы эксплуатации). Донецк: Ноулидж, 2012. 374 с.
- Ярмолук В.В., Коваленко В.И., Сальникова Е.Б., Козаков И.К., Котов А.Б., Ковач В.П., Владыкин Н.В., Яковлева С.З. Позднерифейский рифтогенез и распад Лавразии: данные геохронологических исследований щелочно-ультраосновных комплексов южного обрамления Сибирской платформы // ДАН. 2005. Т. 404. № 3. С. 400–406.
- Adamas Intelligence. Rare earth elements: Market issues and outlook. Research report. 2019. 10 p. URL: <https://www.adamasintel.com/> (доступ 02.12.2020).
- Amores S. Evolución metalogenética de complejos carbonatíticos en contexto hipoabisal y plutónico: Bonga y Monte Verde (Angola). PhD thesis. Universitat de Barcelona, Spain. 2017. 423 p.
- Andersen A.K., Clark J.G., Larson P.B., Donovan J.J. REE fractionation, mineral speciation, and supergene enrichment of the Bear Lodge carbonatites, Wyoming, USA // Ore Geol. Rev. 2017. V. 89. P. 780–807.
- Andreoli M.A.G., Smith C.B., Watkeys M., Moore J.M., Ahwal L.D., Hart R.J. The geology of the Steenkampskraal monazite deposit, South Africa: implications for REE-Th-Cu mineralization in Charnockite-granulite terrains // Econ. Geol. 1994. V. 89. P. 994–1016.
- Aseri A.A. Rare-metal alkaline granite from the Arabian shield, Saudi Arabia. PhD thesis. University of Western Ontario, London, Canada. 2020. 445 p.
- Audi G., Bersillon O., Blachot J., Wapstra A.H. The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties // Nuclear Physics A. 2003. V. 729 (1). P. 3–128.
- Balaram V. Rare earth elements: a review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact // Geoscience Frontiers. 2019. V. 10 (4). P. 1285–1303.
- Basson I.J., Muntingh J.A., Jellicoe B.C., Anthonissen C.J. Structural interpretation of the Steenkampskraal monazite deposit, Western Cape, South Africa // J. African Earth Sciences. 2016. V. 121. P. 301–315.
- Bastos Neto A.C., Pereira V.P., Ronchi L.H., de Lima E.F., Frantz J.C. The world class Sn, Nb, Ta, F (Y, REE, Li) deposit and the massive cryolite associated with the albite-enriched facies of the Madeira A-type granite, Pitinga mining district, Amazonas state, Brazil // Canadian Mineralogist. 2009. V. 47. Pt. 6. P. 1329–1357.
- Batapola N.M., Dushyantha N.P., Premasiri H.M.R., Abeysinghe A.M.K.B., Rohitha L.P.S., Ratnayake N.P., Dissanayake D.M.D.O.K., Ilankoon I.M.S.K., Dharmaratne P.G.R. A comparison of global rare earth element (REE) resources and their mineralogy with REE prospects in Sri Lanka // J. Asian Earth Sciences. 2020. V. 200. Paper 104475. P. 1–15.
- Bauer P.W., Pollock T.R. Compilation of Precambrian isotopic ages in New Mexico. New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources Open-File Report 389. Socorro, 1993. 128 p.
- Benaouda R., Kraemer D., Sitnikova M., Goldmann S., Schwarz-Schampera U., Errami A., Mouttaqi A., Bau M. Discovery of high-grade REE-Nb-Fe mineralization associated with calcic carbonatite in South Morocco // Ore Geol. Rev. 2020. V. 124. Paper 103631. 17 p.
- Berger M. Geology and mineralization of the Pajarita Mountain layered peralkaline syenitic pluton-hosted REE-Zr prospect, Mescalero Apache Reservation, New Mexico. MSc thesis. Colorado School of Mines, Golden, USA. 2018. 93 p.
- Borst A.M., Smith M.P., Finch A.A., Estrade G., Villanova-de-Benavent C., Nason P., Marquis E., Horsburgh N.J., Goodenough K.M., Xu C., Kynický J., Geraki K. Adsorption of rare earth elements in regolith-hosted clay deposits // Nature Communications. 2020. V. 11. Paper 4386. P. 1–15.
- Broom-Fendley S., Brady A.E., Horstwood M.S.A., Woolley A.R., Mtegha J., Wall F., Dawes W., Gunn G. Geology, geochem-

- istry and geochronology of the Songwe Hill carbonatite, Malawi // *J. African Earth Sciences*. 2017. V. 134. P. 10–23.
- Cahen L., Snelling N.J., Delhal J., Vail J.R.* The geochronology and evolution of Africa. Clarendon Press, Oxford. 1984. 512 p.
- Chakhmouradian A.R., Zaitsev A.N.* Rare earth mineralization in igneous rocks: sources and processes // *Elements*. 2012. V. 8 (5). P. 347–353.
- Chandler R., Spandler C.* The igneous petrogenesis and rare metal potential of the peralkaline volcanic complex of the southern Peak Range, Central Queensland, Australia // *Lithos*. 2020. V. 358–359. Paper 105386. 18 p.
- Chikanda F., Otake T., Ohtomo Y., Ito A., Yokoyama T.D., Sato T.* Magmatic-hydrothermal processes associated with rare earth element enrichment in the Kangankunde carbonatite complex, Malawi // *Minerals*. 2019. V. 9 (7). Paper 442. 22 p.
- Ciuculescu T., Foo P., Gowans R., Hawton K., Jacobs C., Spooner J.* Technical Report disclosing the results of the feasibility study on the Nechalacho rare earth elements project. Canada, Toronto: Micon Int. Ltd, 2013. 307 p. URL: https://www.avalonadvancedmaterials.com/_resources/projects/may_2013_ni43_report.pdf (20.05.2021)
- Cocker M.D.* Lateritic, supergene rare earth element (REE) deposits // Arizona Geological Survey Special Paper 9. Chapter 4. Phoenix: Arizona Geological Survey. 2014. P. 1–18.
- Cohen B.E., Knesel K.M., Vasconcelos P.M., Schellart W.P.* Tracking the Australian plate motion through the Cenozoic: Constraints from ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology // *Tectonics*. 2013. V. 32(5). P. 1371–1383.
- Connelly N.G., Damhus T., Hartshorn R.M., Hutton A.T.* Nomenclature of inorganic chemistry – IUPAC recommendations 2005. Cambridge: Royal Society of Chemistry. 2005. 377 p.
- Costi H.T., Dall'agnol R., Moura C.A.V.* Geology and Pb-Pb geochronology of Paleoproterozoic volcanic and granitic rocks of Pitinga Province, Amazonian Craton, Northern Brazil // *International Geology Review*. 2000. V. 42 (9). P. 832–849.
- Courtney-Davies L., Ciobanu C.L., Tapster S.R., Cook N.J., Ehrig K., Crowley J.L., Verdugo-Ihl M.R., Wade B.P., Condon D.J.* Opening the magmatic-hydrothermal window: high-precision U–Pb geochronology of the Mesoproterozoic Olympic Dam Cu–U–Au–Ag Deposit, South Australia // *Econ. Geol.* 2020. V. 115. P. 1855–1870.
- Crossland Uranium Mines Ltd. Charley Creek rare earths project scoping study results. ASX Release, 15th April 2013. 54 p. URL: <http://www.asx.com.au/asxpdf/20130415/pdf/42f7v06gx1svy4.pdf> (16.03.2021).
- Daigle P.* Technical Report on the Clay-Howells Fe-REE Project, Ontario, Canada, to the Rare Earth Metals Inc. Toronto: Tetra Tech. 2011. 145 p. URL: <http://www.canadarareearth.com/upload/documents/technical-report-on-the-clay-howells.pdf> (15.12.2020)
- Daigle P.* Technical report and resource estimate of the Lavergne-Springer REE project, Ontario, Canada, to the Rare Earth Metals Inc. Toronto: Tetra Tech. 2012. 174 p. URL: <http://www.canadarareearth.com/upload/documents/springer-technical-report.pdf> (20.12.2020)
- Dalsin M.L.* The mineralogy, geochemistry and geochronology of the Wicheeda carbonatite complex, British Columbia. MSc thesis. University of British Columbia, Vancouver, Canada. 2013. 285 p.
- David J., Dion C., Goutier J., Roy P., Bandyayera D., Le-gault M., Rhéaume P.* Datations U–Pb effectuées dans la Sous-province de l'Abitibi à la suite des travaux de 2004–2005. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec. 2006. RP 2006-04. 22 p.
- Deady E., Lacinska A., Goodenough K.M., Shaw R.A., Roberts N.M.W.* Volcanic-derived placers as a potential resource of rare earth elements: the Aksu Diamas case study, Turkey // *Minerals*. 2019. V. 9. Paper 208. 31 p.
- Deng M., Xu C., Song W., Tang H., Liu Y., Zhang Q., Zhou Y., Feng M., Wei C.* REE mineralization in the Bayan Obo deposit, China: Evidence from mineral paragenesis // *Ore Geol. Rev.* 2017. V. 91. P. 100–109.
- Dostal J.* Rare earth element deposits of alkaline igneous rocks // *Resources*. 2017. V. 6 (3). Paper 34. P. 1–12.
- Downes H., Wall F., Demény A., Szabó C.* Continuing the carbonatite controversy // *Mineral. Mag.* 2012. V. 76. P. 255–257.
- Downes P.J., Dunkley D.J., Fletcher I.R., McNaughton N.J., Rasmussen B., Jaques A.L., Verrall M., Sweetapple M.T.* Zirconolite, zircon and monazite-(Ce) U–Th–Pb age constraints on the emplacement, deformation and alteration history of the Cummins Range Carbonatite Complex, Halls Creek Orogen, Kimberley region, Western Australia // *Mineral. Petrol.* 2016. V. 110 (2–3). P. 199–222.
- Druecker M., Simpson R.G.* Technical report on the Sarfartoq project, West Greenland, prepared for Hudson Resources Inc. Vancouver: Damien Consultants GeoSim Services. 2012. 98 p. URL: [https://www.sedar.com/\(20.12.2020\)](https://www.sedar.com/(20.12.2020))
- Drysdall A.R., Douch C.J.* Nb–Th–Zr mineralization in microgranite–microsyenite at Jabal Tawlah, Midyan region, Kingdom of Saudi Arabia // *J. Afr. Earth Sciences*. 1986. V. 4. P. 275–288.
- Duhamel I.* Caractérisation des sources d'uranium à l'Archéen: mécanismes de genèse des gisements d'uranium les plus anciens (3,0 à 2,2 Ga) et des préconcentrations uranifères paléoproterozoïques. PhD thesis. Université Henri Poincaré, Nancy, France. 2010. 442 p.
- Dushyantha N., Batapola N., Ilankoon I.M.S.K., Rohitha S., Premasiri R., Abeysinghe B., Ratnayake N., Dissanayake K.* The story of rare earth elements (REEs): Occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global production // *Ore Geol. Rev.* 2020. V. 122. Paper 103521. P. 1–17.
- Eggert R., Wadia C., Anderson C., Bauer D., Fields F., Meinert F., Taylor P.* Rare earths: Market disruption, innovation, and global supply chains // *Annual Review of Environment and Resources*. 2016. V. 41. P. 199–222.
- Ehrig K., McPhie J., Kamenetsky V.S.* Geology and mineralogical zonation of the Olympic Dam iron oxide Cu–U–Au–Ag deposit, South Australia // *Geology and genesis of major copper deposits and districts of the world – A tribute to Richard H Sillitoe*. Society of Economic Geologists Special Publication 16. *Hedenquist J.W., Harris M., Camus F.*, (eds.). 2012. P. 237–267.

- Elsner H.* Heavy minerals of economic importance. Assessment manual. Hannover: BGR, 2010. 218 p.
- Ernst R.E.* Large igneous provinces. Cambridge University Press, 2014. 653 p.
- Fockema P.D.* The heavy mineral deposits north of Richards Bay // *Anhaeusser C.R., Maske S.* (eds.): Mineral deposits of Southern Africa. Johannesburg: Geological Society of South Africa. 1986. V. 2. P. 2301–2307.
- Fosu B.R., Ghosh P., Chew D.M., Viladkar S.G.* Composition and U-Pb ages of apatite in the Amba Dongar carbonatite-alkaline complex, India // *Geological Journal*. 2019. V. 54. P. 3438–3454.
- Gambogi J.* Rare Earths // Mineral Commodity Summaries. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey. 2021. P. 132–133.
- Gambogi J., Ghalayini Z.T.* Thorium // Minerals Yearbook 2017. U.S. Geological Survey. 2020. P. 77.1–77.5. URL: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/thorium-statistics-and-information> (07.05.2021)
- Gandhi S.S., Krogh T.E., Corfu F.* U-Pb zircon and titanite dates on two granitic intrusions of the Makkovik orogen and a peralkaline granite of the Red Wine intrusive complex, central Labrador // *Geol. Assoc. Can. Ann. Meeting, St. John's, Newfoundland, 1988. Program with Abstracts*. P. A42.
- Geo-Consult International (Pty) Ltd. Geological report and resource estimate for the Glenover carbonatite project. Roodepoort. 2012. 155 p. URL: <https://galileoresources.com/wp-content/uploads/Glenover-Geological-and-Resource-Report-3-August-2012.pdf> (20.12.2020)
- Gerel O., Majigsuren Y., Munkhtsengel B.* Chapter 6: Rare earth deposits // Mineral resources of Mongolia. *Gerel O., Pirajno F., Batkhisig B., Dostal J.* (eds.). Springer Nature, Singapore. 2021. P. 185–210.
- Giovannini A.L., Bastos Neto A.C., Porto C.G., Pereira V.P., Takehar L., Barbanson L., Bastos P.H.S.* Mineralogy and geochemistry of laterites from the Morro dos Seis Lagos Nb (Ti, REE) deposit (Amazonas, Brazil) // *Ore Geol. Rev.* 2017. V. 88. P. 461–480.
- Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Sklyarov E.V., Kotov A.B., Vladykin N.V., Pisarevsky S.A., Larin A.M., Salnikova E.B., Saveleva V.B., Sharygin V.V., Starikova, A.E., Tolmacheva E.V., Velikoslavinsky S.D., Mazukabzov A.M., Bazarova E.P., Kovach V.P., Zagornaya N.Yu., Alyмова N.V., Khromova E.A.* The unique Katugin rare-metal deposit (southern Siberia): Constraints on age and genesis // *Ore Geology Reviews*. 2017. V. 91. P. 246–263.
- Golev A., Scott M., Erskine P.D., Ali S.H., Ballantyne G.R.* Rare earths supply chains: Current status, constraints and opportunities // *Resources Policy*. 2014. V. 41. P. 52–59.
- Goodenough K.M., Schilling J., Jonsson E., Kalvig P., Charles N., Tuduri J., Deady E.A., Sadeghi M., Schiellerup H., Müller A., Bertrand G., Arvanitidis N., Eliopoulos D.G., Shaw R.A., Thrane K., Keulen N.* Europe's rare earth element resource potential: an overview of REE metallogenetic provinces and their geodynamic setting // *Ore Geol. Rev.* 2016. V. 72. pt. 1. P. 838–856.
- Goodenough K.M., Wall F., Merriman D.* The rare earth elements: Demand, global resources, and challenges for resourcing future generations // *Natural Resources Research*. 2018. V. 27 (2). P. 201–216.
- Graham S., Lambert D., Shee S.* The petrogenesis of carbonatite, melonite and kimberlite from the Eastern Goldfield Province, Yilgarn Craton // *Lithos*. 2004. V. 76. P. 519–533.
- Gronen L.H., Sindern S., Katzmarzyk J.L., Bormann U., Hellmann A., Wotruba H., Meyer F.M.* Mineralogical and chemical characterization of Zr-REE-Nb ores from Khalzan Buregtei (Mongolia) – Approaches to more efficient extraction of rare metals from alkaline granitoids // *Minerals*. 2019. V. 9. Paper 217. 23 p.
- Guarino V., Wu F.-Y., Lustrino M., Melluso L., Brotzu P., Gomes C.d.B., Ruberti E., Tassinari C.C.G., Svisero D.P.* U-Pb ages, Sr–Nd isotope geochemistry, and petrogenesis of kimberlites, kamaufugites and phlogopite-picrites of the Alto Paranaíba Igneous Province, Brazil // *Chem. Geol.* 2013. V. 353. P. 65–82.
- Guarino V., Wu F.-Y., Melluso L., de Barros Gomes C., Tassinari C.C.G., Ruberti E., Brilli M.* U–Pb ages, geochemistry, C–O–Nd–Sr–Hf isotopes and petrogenesis of the Catalão II carbonatitic complex (Alto Paranaíba igneous province, Brazil): implications for regional-scale heterogeneities in the Brazilian carbonatite associations // *Inter. J. Earth Sciences (Geol. Rundsch.)*. 2017. V. 106. P. 1963–1989.
- Gupta C.K., Krishnamurthy N.* Extractive metallurgy of the rare earths. CRC Press, 2005. 508 p.
- Gysi A.P., Williams-Jones A.E., Collins P.* Lithogeochemical vectors for hydrothermal processes in the Strange Lake peralkaline granitic REE–Zr–Nb deposit // *Econ. Geol.* 2016. V. 111. P. 1241–1276.
- Haley J.T.* 1.3 Ga bimodal volcanism in southeastern Labrador: Fox Harbour. MSc thesis. Memorial University of Newfoundland, St. John's, Canada. 2014. 204 p.
- Harmer R.E., Nex P.A.M.* Rare earth deposits of Africa // *Episodes*. 2016. V. 39 (2). P. 381–406.
- Harper F., Wiid G., Siegfried P., Brown J., Hall M., Njowa G, Vivier J., Zietsman R., Duke V.* NI 43-101 independent technical report on the results of a preliminary feasibility study on the Zandkopsdrift rare earth element and manganese by-product project in the Northern Cape Province of South Africa for Frontier Rare Earths Ltd. RSA: Venmyn Deloitte Ltd., 2015. 226 p. URL: <https://frontierrareearth.com/wp-content/uploads/2015/06/June15-ITR-PFS-Zkd-SEDAR.pdf>. (17.03.2021).
- Hastings Technology Metals Ltd. Yangibana project: definitive feasibility study executive summary. Perth, 2017. 66 p. URL: <https://hastingstechmetals.com/projects/yangibana> (14.12.2020)
- Hedrick J.B.* Rare Earths // Mineral Commodity Summaries. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey. 2001. P. 130–131.
- Hoatson D.M., Jaireth S., Mieziitis Y.* The major rare-earth element deposits of Australia: geological setting, exploration, and resources. Canberra: Geoscience Australia. 2011. 204 p.
- Holland H.D.* The oxygenation of the atmosphere and oceans // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2006. V. 361. P. 903–915.
- Hughes J., Christiansen O.* Rare earth mineralization of the Qeqertaasaq carbonatite complex, West Greenland //

- Trans. Inst. Mining and Metallurgy, Section B. 2011. V. 120 (2). P. 67–68.
- Huston D.L., Maas R., Cross A., Hussey K.J., Mernagh T.P., Fraser G., Champion D.C. The Nolans Bore rare-earth element-phosphorus-uranium mineral system: geology, origin and post-depositional modifications // Mineral. Deposita. 2016. V. 51. P. 797–822.
- Jackson N.J., Douch C.J. Jabal Hamra REE-mineralized silicite, Hijaz region, Kingdom of Saudi Arabia // J. African Earth Sciences. 1986. V. 4. 269–274.
- Jaireth S., Hoatson D., Mieziitis Y. Geological setting and resources of the major rare-earth element deposits in Australia // Ore Geol. Rev. 2014. V. 62. P. 72–128.
- Kalashnikov A.O., Konopleva N.G., Pakhomovsky Ya.A., Ivanyuk G.Yu. Rare earth deposits of the Murmansk region, Russia – a review // Econ. Geol. 2016. V. 111. P. 1529–1559.
- Kamo S.L., Krogh T.E., Kumarapeli P.S. Age of the Grenville dyke swarm, Ontario – Quebec: Implications for the timing of lapetan rifting // Can. J. Earth Sci. 1995. V. 32. P. 273–280.
- Kim J.N., Han R.Y., Zhao L., Li Q.L., Kim S.S. Study on the petrographic and SIMS zircon U–Pb geochronological characteristics of the magmatic rocks associated with the Jongju and Cholsan REE deposits in Northern Korean Peninsula // Acta Petrologica Sinica. 2016. V. 32 (10). P. 3123–3138. (in Chinese with English abstract)
- Knoper M.W. The Mesoproterozoic Steenkampskraal rare-earth element deposit in Namaqualand, South Africa // 2010 GSA Denver Annual Meeting (31 October–3 November 2010). Paper No. 132–134.
- Krogh T.E., Davis D.W., Corfu F. Precise U–Pb zircon and baddeleyite ages from the Sudbury area // Pye E.G., Naldrett A.J., Giblin P.E. (eds.): The geology and ore deposits of the Sudbury Structure. Ontario Geological Survey, Toronto. 1984. P. 431–446.
- Krumrei T.V., Villa I.M., Marks M.A.W., Markl G. A $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and U/Pb isotopic study of the Ilímaussaq complex, South Greenland: Implications for the 40K decay constant and for the duration of magmatic activity in a peralkaline complex // Chem. Geol. 2006. V. 227. P. 258–273.
- Laval M., Johan V., Tourlière B. La carbonatite de Mabounié: exemple de formation d'un gîte résiduel à pyrochlore // Chronique de la Recherche Minière. 1988. № 491. P. 125–36.
- Li Y.H.M., Zhao W.W., Zhou M.F. Nature of parent rocks, mineralization styles and ore genesis of regolith-hosted REE deposits in South China: an integrated genetic model // J. Asian Earth Sciences. 2017. V. 148. P. 65–95.
- Ling X., Li Q., Liu Y., Yang Y., Liu Y., Tang G., Li X. In situ SIMS Th–Pb dating of bastnaesite: constraint on the mineralization time of the Himalayan Mianning–Dechang rare earth element deposits // J. Analytical Atomic Spectrometry. 2016. V. 31. P. 1680–1687.
- Linnen R.L., Samson I.M., Williams-Jones A.E., Chakhmouradian A.R. Chapter 13.21 – Geochemistry of the rare-earth element, Nb, Ta, Hf, and Zr deposits // H.D. Holland, K.K. Turekian (eds.): Treatise on Geochemistry (2nd Edition). Amsterdam: Elsevier. 2014. P. 543–568.
- Liu Y., Hou Z. A synthesis of mineralization styles with an integrated genetic model of carbonatite–syenite-hosted REE deposits in the Cenozoic Mianning–Dechang REE metallogenic belt, the eastern Tibetan Plateau, southwestern China // J. Asian Earth Sciences. 2017. V. 137. P. 35–79.
- Machado N., Clark T., David J., Goulet N. U–Pb ages for magmatism and deformation in the New Québec Orogen // Can. J. Earth Sciences. 1997. V. 34. P. 716–723.
- Makanga J.F., Edou-Minko A. Etude pétrographique et géochimique du complexe annulaire de Mabounie (Gabon) // African J. Science and Technology. 2003. V. 4 (1). P. 67–77.
- Marien C., Dijkstra A.H., Wilkins C. The hydrothermal alteration of carbonatite in the Fen Complex, Norway: mineralogy, geochemistry, and implications for rare-earth element resource formation // Mineralogical Magazine. 2018. V. 82 (S1). P. S115–S131.
- McCreath J.A., Finch A.A., Simonsen S.L., Donaldson C.H., Armour-Brown A. Independent ages of magmatic and hydrothermal activity in alkaline igneous rocks: The Motzfeldt Centre, Gardar Province, South Greenland // Contrib. Mineral. Petrol. 2012. V. 163 (6). P. 967–982.
- Meakin N.S., Morgan E.J. Dubbo 1 : 250000 geological sheet SI/55-4. Explanatory Notes (2nd ed.). Geol. Surv. New South Wales, Sydney, 1999. 504 p.
- Meert J.G., Torsvik T.H., Eide, E.A., Dahlgren S. Tectonic significance of the Fen Province, S. Norway: Constraints from geochronology and paleomagnetism // J. Geology. 1998. V. 106. P. 553–564.
- Miller R.R. Pantellerite-hosted rare earth element mineralization in southeast Labrador: The Foxtrot deposit // Symposium on Strategic and Critical Materials Proceedings, November 13–14, 2015, Victoria, British Columbia. British Columbia Ministry of Energy and Mines, British Columbia Geological Survey Paper 2015-3. P. 109–117.
- Miller R.R., Heaman L.M., Birkett T.C. U–Pb zircon age of the Strange Lake peralkaline complex: implications for the Mesoproterozoic peralkaline magmatism in north-central Labrador // Precambrian Research. 1997. V. 81. P. 67–82.
- Mitchell R.H., Smith D.L. Geology and mineralogy of the Ashram Zone carbonatite, Eldor Complex, Quebec // Ore Geol. Rev. 2017. V. 86. P. 784–806.
- Moghazi A.-K.M., Iaccheri L.M., Bakhsh R.A., Kotov A.B., Ali K.A. Sources of rare-metal-bearing A-type granites from Jabel Sayed complex, Northern Arabian Shield, Saudi Arabia // J. Asian Earth Sciences. V.107. P. 244–258.
- Möller V., Williams-Jones A.E. Stable and radiogenic isotope constraints on the magmatic and hydrothermal evolution of the Nechalacho Layered Suite, northwest Canada // Chem. Geol. 2016. V. 440. P. 248–274.
- Montero P., Haissen F., Mouttaqi A., Molina J.F., Errami A., Sadki O., Cambeses A., Bea F. Contrasting SHRIMP U–Pb zircon ages of two carbonatite complexes from the peri-cratonic terranes of the Reguibat Shield: Implications for the lateral extension of the West African Craton // Gondwana Research. 2016. V. 38. P. 238–250.
- Mott A.V., Bird D.K., Grove M., Rose N., Bernstein S., Mackay H., Krebs J. Karrat Isfjord: a newly discovered Paleoproterozoic carbonatite-sourced REE deposit, Central West Greenland // Econ. Geol. 2013, V. 108. P. 1471–1488.

- Nadeau O., Cayer A., Pelletier M., Stevenson R., Jébrak M.* The Paleoproterozoic Montviel carbonatite-hosted REE-Nb deposit, Abitibi, Canada: Geology, mineralogy, geochemistry and genesis // *Ore Geol. Rev.* 2015. V. 67. P. 314–335.
- Néron A., Bédard L.P., Gaboury D.* The Saint-Honoré carbonatite REE zone, Québec, Canada: combined magmatic and hydrothermal processes // *Minerals*. 2018. V. 8 (9). Art. 397.
- Neumann R., Medeiros E.B.* Comprehensive mineralogical and technological characterisation of the Araxá (SE Brazil) complex REE (Nb-P) ore, and the fate of its processing // *International J. Mineral Processing*. 2015. V. 144. P. 1–10.
- Ngo X.D., Zhao X.-F., Tran T.H., Deng X.-D., Li J.-W.* Two episodes of REEs mineralization at the Sin Quyen IOCG deposit, NW Vietnam // *Ore Geol. Rev.* 2020. V. 125. Paper 103676. 21 p.
- Nguyen T.T., Wada H., Ishikawa T., Shimano T.* Geochemistry and petrogenesis of carbonatites from South Nam Xe, Lai Chau area, northwest Vietnam // *Mineral. Petrol.* 2014. V. 108. P. 371–390.
- Nguyen D.C., Pieczonka J., Piestrzynski A., Duong V.H., Le K.P., Jodlowski P.* General characteristics of rare earth and radioactive elements in Dong Pao deposit, Lai Chau, Vietnam // *Vietnam J. Earth Sciences*. 2017. V. 39 (1). P. 14–26.
- Nikolenko A.M., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., Redina A.A., Prokopyev I.R., Vladykin N.V., Nikolaeva I.V.* Ar-Ar geochronology and petrogenesis of the Mushgai-Khudag alkaline-carbonatite complex (southern Mongolia) // *Lithos*. 2020. V. 372–373. Paper 105675. 15 p.
- Oliver N.H.S., Pearson P.J., Holcombe R.J., Ord A.* Mary Kathleen metamorphic-hydrothermal uranium-rare-earth element deposit: ore genesis and numerical model of coupled deformation and fluid flow // *Australian J. Earth Sci.* 1999. V. 46. P. 467–484.
- ONHYM. Annular structure of Lahjeyra (REE, Nb, Fe, Mo, Au, V) (Southern Provinces, Morocco). 2020₁. 2 p. URL: http://www.onhym.com/pdf/en/MiningOpportunities_Eng_2020/03_Lahjeyra_2020_Eng.pdf (20.12.2020)
- ONHYM. Twihinate and Lamalaga annular structures (REE, Nb, Fe, U) (Southern Provinces, Morocco). 2020₂. 2 p. URL: http://www.onhym.com/pdf/en/MiningOpportunities_Eng_2020/02_Twihinate_2020_Eng.pdf (20.12.2020)
- Palmieri M.* Modelo geológico e avaliação de recursos minerais do depósito de nióbio do Morro do Padre, Complexo alcalino carbonatítico de Catalão II, GO. MSc thesis. University of Brasília, Brazil. 2011. 96 p.
- Paulick H., Machacek E.* The global rare earth element exploration boom: An analysis of resources outside of China and discussion of development perspectives // *Resources Policy*. 2017. V. 52. P. 134–153.
- Paulick H., Rosa D., Kalvig P.* Rare Earth Element projects and exploration potential in Greenland. MiMa Rapport 2015/2. Copenhagen: GEUS. 2015. 51 p. URL: <https://www.geus.dk/om-geus/nyheder/nyhedsarkiv/2015/maj/rare-earth-element-ree-exploration-in-greenland> (015.12.2020)
- Pensana Metals Ltd.* Preliminary feasibility study for the Longonjo NdPr project. ASX Release 15 November 2019. 82 p. URL: <https://pensana.co.uk/wp-content/uploads/2020/09/PFS-15.11.2019-1.pdf> (11.03.2021).
- Pinto-Ward C.* Controls on the enrichment of the Serra Verde rare earth deposit, Brazil. PhD thesis. Imperial College, London, England. 2017. 442 p.
- Poletti J.E., Cottle J.M., Hagen-Peter G.A., Lackey J.S.* Petrochronological constraints on the origin of the Mountain Pass ultrapotassic and carbonatite intrusive suite, California // *J. Petrology*. 2016. V. 57 (8). P. 1555–1598.
- Pollard B., Mapleson D.* NI 43-101 Technical report for the Mrima Hill niobium and rare earth project, Kwale District, Kenya. Prepared for Pacific Wildcat Resources Corp. Perth: BMGS. 2013. 169 p. URL: <https://www.sedar.com> (17.03.2021).
- Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., Sergeev S.A.* Mineralogy, age and genesis of apatite-dolomite ores at the Seligdar apatite deposit (Central Aldan, Russia) // *Ore Geol. Rev.* 2017. V. 81. P. 296–308.
- Qadhi T.M.* Origin and hydrothermal alteration of rare-metal granites in the Al-Hamra area, northeastern Arabian Shield, Saudi Arabia // *Central European Geology*. 2007. V. 50 (3). P. 259–282.
- Qiu K., Yu H., Wu M., Geng J., Ge X., Gou Z., Taylor R.D.* Discrete Zr and REE mineralization of the Baerzhe rare-metal deposit, China // *Amer. Mineral.* 2019. V. 104. P. 1487–1502.
- Ram R., Becker M., Brugger J., Etschmann B., Burcher-Jones C., Howard D., Kooyman P.J., Petersen J.* Characterization of a rare earth element- and zirconium-bearing ion-adsorption clay deposit in Madagascar // *Chem. Geol.* 2019. V. 522. P. 93–107.
- Ramsden A.R., French D.H., Chalmers D.I.* Volcanic-hosted rare-metals deposit at Brockman, Western Australia: mineralogy and geochemistry of the Niobium Tuff // *Mineral. Deposita*. 1993. V. 28. P. 1–12.
- Ribeiro C.C.* Geologia, geometalurgia, controles e gênese dos depósitos de fósforo, terras raras e titânio do complexo carbonatítico Catalão I, GO. PhD thesis. Universidade de Brasília, Brazil. 2008. 473 p.
- Richards M.* Rare-earth element-niobium mineralized carbonatite, Clay Howells Alkaline Complex, Kapuskasing, Ontario: significance of magnetite saturation and fractionation // *Atlantic Geology*. 2011. V. 47 (1). P. 208–209.
- Rossoni M.B., Bastos Neto A.C., Souza V.S., Marques J.C., Dantas E., Botelho N.F., Giovannini A.L., Pereira V.P.* U-Pb zircon geochronological investigation on the Morro dos Seis Lagos Carbonatite Complex and associated Nb deposit (Amazonas, Brazil) // *J. South American Earth Sciences*, 2017. V. 80. P. 1–17.
- Rukhlov A.S., Bell K.* Geochronology of carbonatites from the Canadian and Baltic Shields, and the Canadian Cordillera: clues to mantle evolution // *Mineral. Petrol.* 2010. V. 98. P. 11–54.
- Rudnick R.L., Gao S.* Composition of the continental crust // *Treatise on Geochemistry*. V. 3. Crust. Chap. 3.01 / *Rudnick R.L., Holland H.D., Turekian K.K.* (eds.), Oxford: Elsevier and Pergamon, 2003. P. 1–64.
- Schonwandt H.K., Barnes G.B., Ulrich T.* A description of the world-class rare earth element deposit, Tanbreez, South Greenland // *Rare Earths Industry: Technological, Eco-*

- onomic and Environmental Implications / *I.B. De Lima & W.L. Filho* (eds.), London: Elsevier, 2016. P. 73–85.
- Secher K., Heaman L.M., Nielsen T.F.D., Jensen S.M., Schjoth F., Creaser R.A.* Timing of kimberlite, carbonatite, and ultramafic lamprophyre emplacement in the alkaline province located 64°–67° N in southern West Greenland // *Lithos*. 2009. V. 112S. P. 400–406.
- Serdyuk S.S., Lomayev V.G., Kuzmin V.I., Flett D.S., Gudkova N.V., Kuzmin D.V., Mulagaleeva M.A., Kuzmina V.N., Kalyakin S.N., Logutenko O.A.* The Chuktukon niobium-rare earth metals deposit: Geology and investigation into the processing options of the ores // *Minerals Engineering*. 2017. V. 113. P. 8–14.
- Shea M.E.* Isotopic geochemical characterization of selected nepheline syenites and phonolites from the Poços de Caldas alkaline complex, Minas Gerais, Brazil // *J. Geochemical Exploration*. 1992. V. 45. P. 173–214.
- Sheth H., Pande K., Vijayan A., Sharma K.K., Cucciniello C.* Recurrent Early Cretaceous Indo-Madagascar (89–86 Ma) and Deccan (66 Ma) alkaline magmatism in the Sarnu-Dandali complex Rajasthan: 40Ar/39Ar age evidence and geodynamic significance // *Lithos*. 2017. V. 284–285. P. 512–524.
- Simandl G.J.* Geology and market-dependent significance of rare earth element resources // *Mineral. Deposita*. 2014. V. 49. P. 889–904.
- Singh Y.* Rare earth element resources: Indian context. Springer Nature Switzerland, 2020. 395 p.
- Sjöqvist A.S.L., Zack T., Honn D.K., Baxter E.F.* Modification of a rare-earth element deposit by low-temperature partial melting during metamorphic overprinting: Norra Kärr alkaline complex, southern Sweden // *Chem. Geol.* 2020. V. 545. Paper 119640. 13 p.
- Slezak P., Spandler C.* Carbonatites as recorders of mantle-derived magmatism and subsequent tectonic events: An example of the Gifford Creek Carbonatite Complex, Western Australia // *Lithos*. 2019. V. 328–329. P. 212–227.
- Smith M.P., Moore K., Kavecsánszki D., Finch A.A., Kynicky J., Wall F.* From mantle to critical zone: a review of large and giant sized deposits of the rare earth elements // *Geoscience Frontiers*. 2016. V 7 (3). P. 315–334.
- Snelling N.J.* Age determinations on three African carbonatites // *Nature*. 1965. V. 30. P. 491.
- Sonoki I.K., Garda G.M.* Idades K/Ar de rochas alcalinas do Brasil meridional e Paraguai oriental: Compilacao e adaptacao as novas constantes de decaimento // *Boletim do Instituto de Geociencias, Universidade da Sao Paulo, Serie Cientifica*. 1988. V. 19. P. 63–85.
- Sørensen L.L., Kalvig P., Rosa D.* The rare earth element potential in Greenland. Exploration and mining in Greenland: geology and ore. № 29. Copenhagen: GEUS. 2018. 12 p.
- Spandler C., Morris C.* Geology and genesis of the Toongi rare metal (Zr, Hf, Nb, Ta, Y and REE) deposit, NSW, Australia, and implications for rare metal mineralization in peralkaline igneous rocks // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2016. V. 171. P. 104–127.
- Spandler C., Hammerli J., Sha P., Hilbert-Wolf H., Hu Y., Roberts E., Schmitz M.* MKED1: A new titanite standard for in situ analysis of Sm–Nd isotopes and U–Pb geochronology // *Chem. Geol.* 2016. V. 425. P. 110–126.
- Su J.-H., Zhao X.-F., Li X.-C., Hu W., Chen M., Xiong Y.-L.* Geological and geochemical characteristics of the Miaoya syenite-carbonatite complex, Central China: Implications for the origin of REE-Nb-enriched carbonatite // *Ore Geol. Rev.* 2019. V.113. Paper 103101. 20 p.
- Takehara L., Silveira F.V., Santos R.V.* Chapter 4 – Potentiality of rare earth elements in Brazil // *I.B. De Lima, W.L. Filho* (eds.): Rare Earths Industry. Elsevier. 2016. P. 57–72.
- Taylor W.R., Page R.W., Esslemont G., Rock N.M.S., Chalmers D.I.* Geology of the volcanic-hosted Brockman rare-metals deposit, Halls Cree Mobile Zone, northwest Australia. Part. I. Volcanic environment, geochronology and petrography the Brockman volcanics // *Mineral. Petrol.* 1995. V. 52. P. 209–230.
- Tkachev A.V., Rundqvist D.V., Vishnevskaya N.A.* Metallogeny of lithium through geological time // *Russian J. Earth Sciences*. 2018. V. 18. № 6. Paper ES6002. P. 1–13.
- Tran T.-H., Polyakov G.V., Tran T.-A., Borisenko A.S., Izokh A.E., Balykin P.A., Ngo T.-P., Pham T.-D.* Intraplate magmatism and metallogeny of North Vietnam. Springer International Publishing Switzerland, 2016. 372 p.
- Trofanenko J., Williams-Jones A.E., Simandl G.J., Migdisov A.A.* The nature and origin of the REE mineralization in the Wicheeda carbonatite, British Columbia, Canada // *Econ. Geol.* 2016. V. 111. P. 199–223.
- Tucker R.D., Belkin H.E., Schulz K.J., Peters S.G., Horton F., Buttleman K., Scott E.R.* A major light rare-earth element (LREE) resources in the Khanneshin carbonatite complex, southern Afghanistan // *Econ. Geol.* 2012. V. 107. P. 197–208.
- Van H.D., Lantoarindriaka A., Piestrzynski A., Trinh P.T.* Fort-Dauphin beach sands, south Madagascar: Natural radionuclides and mineralogical studies // *Vietnam J. Earth Sciences*. 2020. V. 42 (2). P. 118–129.
- Van Breemen O., Currie K.L.* Geology and U–Pb geochronology of the Kipawa Syenite Complex – a thrust related alkaline pluton – and adjacent rocks in the Grenville Province of western Quebec // *Canadian J. Earth Sciences*. 2004. V. 41 (4). P. 431–455.
- Verplanck P.L., Mariano A.N., Mariano A. Jr.* Rare earth element ore geology of carbonatites // *Rare earth and critical elements in ore deposits. Reviews in Economic Geology* 18. Littleton, Colorado: SEG. 2016. P. 5–32.
- Verwoerd W.J.* The carbonatites of South Africa and South West Africa. South Africa Geological Survey Handbook. 1967. V. 6. 452p.
- Waber N.* The supergene thorium and rare-earth element deposit at Morro do Ferro, Poços de Caldas, Minas Gerais, Brazil // *J. Geochemical Exploration*. 1992. V. 45. P. 113–157.
- Wall F.* Rare earth elements // *G. Gunn*, ed.: Critical metals handbook. London: Wiley, 2014. P. 312–339.
- Wall F., Barreiro B.A., Spiro B.* Isotopic evidence for late-stage processes in carbonatites: rare earth mineralization in carbonatites and quartz rocks at Kangankunde, Malawi // *Mineral. Magazine*. 1994. V. 58A. P. 951–952.
- Wang D., Zhao Z., Yu Y., Dai J., Deng M., Zhao T., Liu L.* Exploration and research progress on ion-adsorption type

- REE deposit in South China // *China Geology*. 2018. V. 1 (3). P. 415–424.
- Wang C., Liu J., Zhang H., Zhang X., Zhang D., Xi Z., Wang Z. Geochronology and mineralogy of the Weishan carbonatite in Shandong province, eastern China // *Geoscience Frontiers*. 2019. V. 10 (2). P. 769–785.
- Wang Z., Fan H., Zhou L., Yang K., She H. Carbonatite-related REE deposits: an overview // *Minerals*. 2020. V. 10 (11). Paper 965. P. 1–26.
- Wang Z., Li M.Y.H., Liu Z.-R. R., Zhou M.-F. Scandium: Ore deposits, the pivotal role of magmatic enrichment and future exploration // *Ore Geol. Rev.* 2021. V. 128. Paper 103906. P. 1–16.
- Weng Z.H., Jowitt S.M., Mudd G.M., Haque N. A detailed assessment of global rare earth element resources: Opportunities and challenges // *Econ. Geol.* 2015. V. 110. P. 1925–1952.
- Witt W.K., Hammond D.P., Hughes M. Geology of the Ngualla carbonatite complex, Tanzania, and origin of the Weathered Bastnaesite Zone REE ore // *Ore Geol. Rev.* 2019. V. 105. P. 28–54.
- Workman A., Breede K., Goode J. Update report on the Apia Energy Corp. uranium-rare earth property, Elliot Lake district, North-Central Ontario, Canada. Watts, Griffis and McQuat Ltd., Toronto. 2013. 394 p. URL: <http://www.sedar.com> (14.12.2020).
- Wu F.Y., Yang Y.H., Mitchell R.H., Bellatreccia F., Li Q.L., Zhao Z.F. In situ U–Pb and Nd–Hf–(Sr) isotopic investigations of zirconolite and calzirtite // *Chem. Geol.* 2010. V. 277. P. 178–195.
- Xie Y., Hou Z., Goldfarb R.J., Guo X., Wang L. Rare earth element deposits in China // Rare earth and critical elements in ore deposits. *Reviews in Economic Geology* 18. Littleton, Colorado: SEG, 2016. P. 115–136.
- Yang X., Laukkanen J., Torppa A., Enkhzul B., Lkhagvasuren B., Margai D. Mineralogy and beneficiation of vein-type apatite rare earth element ore from Mushgia Khudag, Mongolia // I.B. de Lima, W.L. Filho (eds.): Rare earths industry. technical, economic, and environmental implications. Elsevier, 2015. P. 377–392.
- Zhang S.-H., Zhao Y., Liu Y. A precise zircon Th–Pb age of carbonatite sills from the world’s largest Bayan Obo deposit: Implications for timing and genesis of REE–Nb mineralization // *Precambrian Research*, 2017. P. 202–219.
- Zhang W., Chen W.T., Gao J.F., Chen H.K., Li J.H. Two episodes of REE mineralization in the Qinling Orogenic Belt, Central China: in-situ U–Th–Pb dating of bastnäsite and monazite // *Mineralium Deposita*. 2019. V. 54. P. 1265–1280.
- Zhou B., Li Z., Chen C. Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies // *Minerals*. 2017. V. 7. Paper 203. P. 1–14.