

## Специализация месторождений редких земель по элементному составу их руд

©2023 А. В. Ткачев<sup>✉</sup>, Н. А. Вишневецкая, Е. И. Чесалова

*Государственный геологический музей им. В. И. Вернадского РАН (ГГМ РАН),  
ул. Моховая 11, стр. 11, 125009, Москва, Российская Федерация*

### Аннотация

*Введение:* Масштабы использования редкоземельных элементов (РЗЭ) промышленностью в XXI в. увеличиваются высокими темпами. Однако потребность в отдельных РЗЭ растет неравномерно: для части элементов рост спроса очень большой, для других он менее значительный или отсутствует. Из-за диспропорций между возможностями используемой в настоящее время ресурсной базы и потреблением отдельных РЗЭ цены на дефицитные празеодим (Pr), неодим (Nd) и тяжелые лантаноиды (Ln<sub>у</sub>) на 1–2 порядка выше, чем на остальные РЗЭ. Важность этих элементов как для традиционных, так и инновационных отраслей современной промышленности делает их не просто дефицитными, а критичными. Поэтому геологоразведочные компании во всем мире рассматривают выявление месторождений с повышенной долей дефицитных РЗЭ в качестве большого бонуса. При этом на начальном этапе работы часто ведутся без предварительной стратегии, т.к. в научной и методической литературе отсутствуют эмпирически обоснованные данные о возможных вариациях колебаний соотношений между дефицитными и недефицитными РЗЭ в месторождениях разных типов. Наше исследование имеет целью исправить такое положение вещей.

*Данные и методика анализа:* Собраны и впервые сопоставлены данные о распределении РЗЭ в рудах 127 месторождений РЗЭ со всего мира. Месторождения представляют девять металлогенических типов, к которым проявлялся интерес со стороны геологоразведочных или добывающих компаний в последние десятилетия.

*Результаты и обсуждение:* Были установлены возможные диапазоны значений для относительных долей (%) дефицитных групп РЗЭ (Pr+Nd min–max/mean; Ln<sub>у</sub> min–max/mean) в рудах месторождений следующих металлогенических типов: карбонатитовом (11.2–35.0/19.4; 0.4–7.6/2.2), гипергенном в карбонатитах (15.2–28.9/21.4; 0.6–7.7/3.4), фойдном (14.0–25.6/18.1; 1.2–17.6/8.1), сиенитовом (16.1–20.9/18.9; 3.1–16.3/8.7), щелочногранитном (0.2–20.7/11.5; 7.8–34.0/21.7), субщелочногранитном (13.5–23.4/17.7; 0.1–13.3/3.5), ионно-адсорбционном (4.2–36.8/22.3; 4.5–34.2/16.3), россыпном (18.8–25.3/21.7; 1.6–11.9/5.4) и внутриразломном (4.6–10.5/7.6; 19.7–28.2/23.9). Для некоторых типов месторождений установлены минералогические или геологические особенности, влияющие на увеличение доли дефицитных РЗЭ в рудах.

*Заключение:* Полученные данные количественно маркируют границы специализации разных типов месторождений РЗЭ на наиболее востребованные группы РЗЭ. Такая информация дает возможность специалистам более целенаправленно проводить региональное прогнозирование и геологоразведочные работы ранних стадий для выявления месторождений с желаемым соотношением разных групп РЗЭ.

**Ключевые слова:** редкоземельные элементы, празеодим, неодим, тяжелые лантаноиды, металлогенические типы месторождений, специализация месторождений



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

<sup>✉</sup> Ткачев Андрей Владимирович, e-mail: [a.tkachev@sgm.ru](mailto:a.tkachev@sgm.ru)

Источник финансирования: Тема FMMR-2022-0013 государственных НИР ГГМ РАН

Для цитирования: Ткачев А. В., Вишневецкая Н. А., Чесалова Е. И. Специализация месторождений редких земель по элементному составу их руд // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2023. № 2. С. 57–72. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/2/57-72>

### Введение

Согласно рекомендациям Международного союза теоретической и прикладной химии (IUPAC), к редкоземельным металлам, чаще именуемым как редкоземельные элементы (РЗЭ), 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 (Sc) [1]. Часто используемый термин «редкие земли» наиболее корректно применим к их оксидам (РЗО), но для краткости употребляется и необходимо для согласования обозначения всей совокупности этих элементов.

В практике геологоразведочных и горнодобывающих компаний принято не включать в список РЗЭ два из них. Первый – это Sc. Его крайне редко рассматривают как извлекаемый элемент в месторождениях остальных РЗЭ: как правило, он образует промышленно интересные концентрации в месторождениях совсем иных типов [2, 3]. Второе исключение – лантаноид прометий (Pm), который в природе встречается только в следовых количествах среди продуктов спонтанного деления урана, и у него нет долгоживущих по геологическим меркам изотопов: самый долгоживущий  $^{145}\text{Pm}$  имеет период полураспада только 17.7 лет [4]. 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 в разных источниках их состав может отличаться. В данной статье принят наиболее распространенный в публикациях и технических докладах вариант такого деления: к легким РЗЭ, которые еще называют цериевыми или цериевой группой, отнесены лантаноиды от лантана до самария ( $\text{Ln}_{\text{Ce}}$ ), к тяжелым РЗЭ, также называемым иттриевыми или иттриевой группой, отнесены остальные лантаноиды и иттрий ( $\text{Ln}_{\text{Y}}+\text{Y}$ ). В научной литературе также можно встретить упоминание средней группы РЗЭ (тоже с разночтениями в ее составе), но в технических докладах этот термин практически не встречается.

Глобальные объемы потребления отдельных РЗЭ в виде металлов и химических соединений очень различны. В самом первом приближении эти количества коррелируются с распространенностью элементов:  $\text{Ln}_{\text{Ce}}$  и Y имеют как более высокие кларки в земной коре и, в среднем, более значительные содержания в рудах, так и более масштабные объемы потребления промышленностью, чем  $\text{Ln}_{\text{Y}}$  (табл. 1).

Тем не менее, на данный момент существует заметный дисбаланс между распространенностью индивидуальных РЗЭ в перерабатываемых рудах, с одной стороны, и структурой их потребления промышлен-

ностью, с другой. Это, наряду со стоимостью извлечения и рафинирования индивидуальных элементов, является одним из главных факторов формирования рыночных цен на них. В последние годы среди РЗЭ цериевой группы, например, установились достаточно высокие цены на Pr и Nd именно из-за быстро растущего спроса при менее заметном росте производства [9]. Среди иттриевых РЗЭ существуют высокие цены на все лантаноиды, а на часть из них – очень высокие (табл. 1).

Специалисты прогнозируют, что на обозримую перспективу спрос для некоторых из них будет и дальше увеличиваться с возможным возникновением существенного дефицита и соответствующего еще большего роста цен [9–12]. К таким элементам относятся Nd, Pr, Dy, Tb, Gd, Ho и Y (в порядке убывания ожидаемой пропорции увеличения спроса и цен).

Для La, Ce и Sm прогнозируется иная ситуация: несмотря на большой объем их потребления (особенно La и Ce), мировой рынок, благодаря той минерально-сырьевой базе, которая в настоящее время вовлечена в эксплуатацию, вполне устойчиво насыщен этими металлами. Более того, в отдельные периоды имеет место заметное перенасыщение ими, и некоторые производители вынуждены реализовывать такие РЗЭ на уровне себестоимости или даже ниже, сводя положительный баланс за счет более дефицитных лантаноидов, или минимизировать затраты, не доводя производство La, Ce и Sm до получения коммерческого продукта [13].

Рыночная ситуация для Y очень специфична: его потребление вполне обеспечено текущими объемами производства, и цены поэтому относительно низкие (табл. 1). Прогнозируемое увеличение спроса на иттрий не столь значительно и вполне может быть удовлетворено в рамках уже эксплуатируемой сырьевой базы. Однако его поставки на мировой рынок очень сильно монополизированы Китаем. Из-за связанных с такой монополизацией рисков Y отнесен к категории критических элементов (как и Pr, и Nd, и большинство  $\text{Ln}_{\text{Y}}$ ) во всех высокоразвитых экономиках мира [14].

Поэтому в последнее время геологоразведочные компании во всем мире проводят экономическую оценку месторождений РЗЭ, акцентируясь, при наличии оснований, на том, что руды имеют повышенные доли именно критически важных (и при этом – наиболее дорогостоящих!) элементов. Это увеличивает инвестиционную привлекательность проектов, т.к. является одним из факторов, повышающих вероятность их промышленного освоения в более короткие сроки. Подтверждения этому можно найти в соответствующих технических докладах по ряду месторождений, которые разведывались/доразведывались в последнее десяти-

титетие. Например, особенное значение Pr+Nd в рудах для общей положительной оценки проекта освоения подчеркивается при экономическом анализе запасов таких месторождений, как Камминс-Рэндж, Ноланс-Бор, Янгибана, Лонгонжу, Нгуалла и ряда других. Экономическая привлекательность месторождений Лофдаль, Кутессай, Стрэндж-Лэйк, Браунс-Рэндж, имею-

щих совсем не высокие средние содержания суммы РЗЭ в руде (0.19–0.89 %), обосновывается высокой долей в этой сумме Ln<sub>Y</sub>±Y. Наконец, в докладах о подсчете запасов месторождений Нечалачо-Базальное, Фокстрот, Серра-Верде отмечаются конкурентные при сравнении со многими месторождениями концентрации как Pr+Nd, так и Ln<sub>Y</sub>+Y.

**Табл. 1.** Кларки РЗЭ в верхней континентальной коре, объемы потребления РЗЭ в мире в 2018 г. (в пересчете на РЗЭ), цены производителей на отдельные РЗЭ  
**[Table 1.** Clarks of REE in the upper continental crust, consumption volumes of REE in the world in 2018 (in terms of REE), producer prices for individual REE]

Элемент [Element]	Кларк, ppm [5] [Clarke number, ppm [5]]	Потребление, 10 <sup>3</sup> тонн [6] [Consumption, 10 <sup>3</sup> tonn [6]]	Средняя цена* 1 кг РЗЭ во втором полугодии 2022 г. [7, 8] [Mean price* per 1 kg REO in the 2 <sup>nd</sup> half-year 2022 [7, 8]]	
			Минимальная чистота продукта, % [Minimal product's purity, %]	евро, [euro]
La	31	43	99.900	1.14
Ce	63	65	99.900	1.25
Pr	7.1	7	99.500	128.45
Nd	27	33	99.500	129.54
Sm	4.7	1	99.900	3.710
Eu	1.0	0.6	99.999	27.73
Gd	4.0	2	99.990	82.42
Tb	0.7	0.7	99.990	2011.50
Dy	3.9	1.5	99.500	366.61
Ho	0.83	0.2	99.500	189.37
Er	2.3	0.5	99.500	51.06
Tm	0.30	<0.1	99.900	2138.76
Yb	2.0	<0.1	99.990	16.1
Lu	0.31	<0.1	99.990	738.42
Y	21	11	99.999	12.28

\* Все цены по [7], кроме оксида тулия [8].

\*[All prices according to [7], except for thulium oxide [8]]

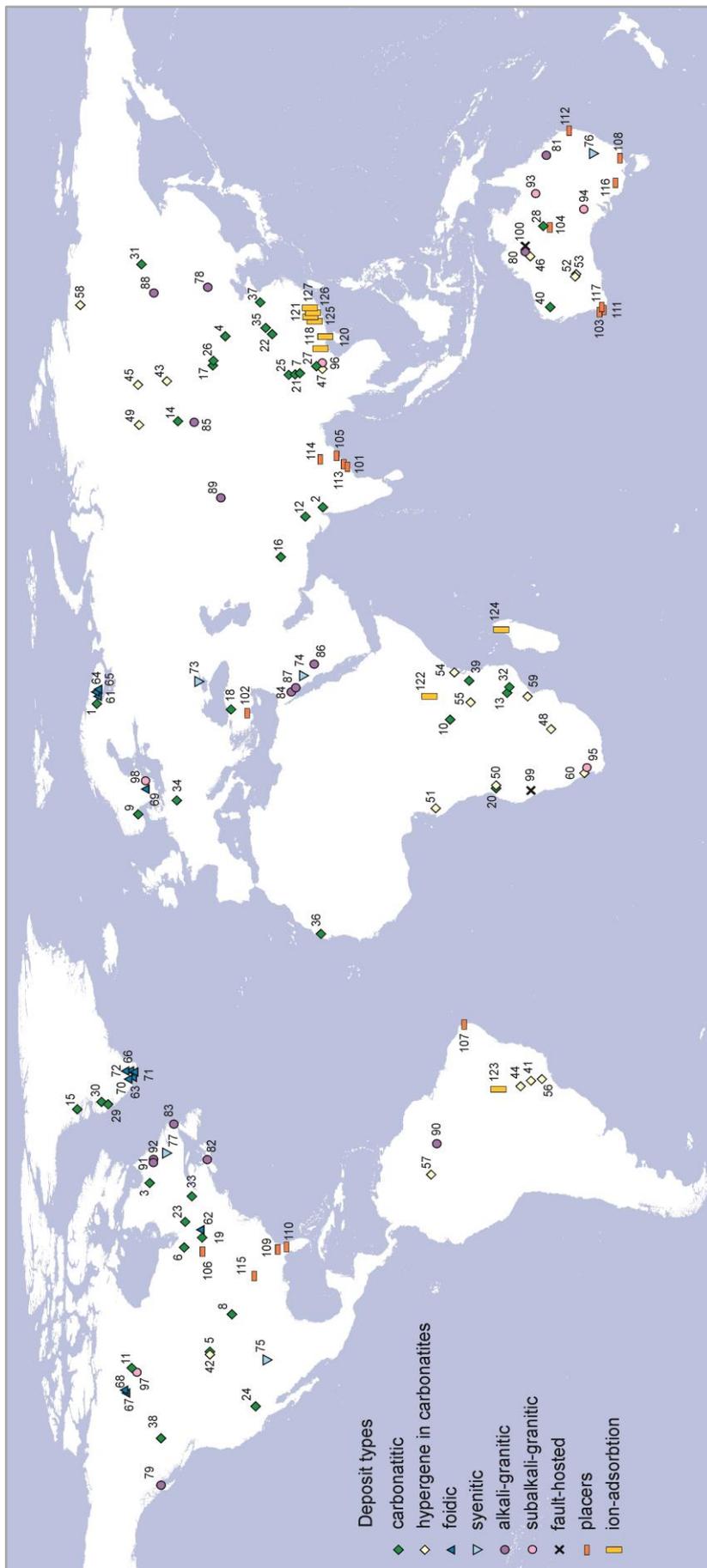
По-видимому, в обозримой перспективе для геологоразведочных компаний главный интерес будет состоять в поиске и оценке не просто месторождений РЗЭ, а объектов, имеющих привлекательное для промышленности соотношение отдельных групп РЗЭ, в первую очередь – повышенные в общей сумме РЗЭ доли Pr+Nd и/или Ln<sub>Y</sub>. Однако данный аспект – специализация разных типов месторождений на ту или иную группу РЗЭ – пока еще не рассмотрен в публикациях, которые могут использоваться при прогнозировании в геологоразведочном процессе. В изданной во всем мире на текущий момент научной и методической литературе, даже самой обстоятельной, анализирующей как отдельные типы месторождений [15–21], так и глобальную ресурсную базу [6, 10, 11, 12, 22–26], поэлементное распределение РЗЭ приводится для единичных примеров месторождений, представляющих только некоторые их типы. Еще реже можно встретить сопоставление представителей разных типов между собой. В целом, содержащаяся в этих источниках информация в лучшем случае дает самое общее без какой-либо конкретизации представление о специализации типов месторождений РЗЭ на цериевую и иттриевую группы. Некоторый акцент на воз-

можности уже оцененной к 2016 г. сырьевой базы мира (49 месторождений за пределами Китая и России) для удовлетворения растущих потребностей экономик западных стран в разных группах РЗЭ сделан в [11]. Однако в этом анализе месторождения не типизированы и даже никак не систематизированы по каким-либо геологическим признакам. Поэтому полученные там результаты мало пригодны для прогнозных построений в геологоразведочном процессе.

Предлагаемое нами исследование имеет целью внести бóльшую конкретность в количественные соотношения между разными группами РЗЭ в пределах каждого из известных типов месторождений редких земель, чтобы эти результаты можно было использовать в региональное прогнозирование и геологоразведочных работах ранних стадий. До этого исследования подобную работу никто еще не осуществлял.

#### Данные и методика анализа

Для исследования были собраны данные по 127 месторождениям, как уже вовлеченных в эксплуатацию, так и претендующих на промышленное освоение в обозримой перспективе (Рис. 1). Усредненные данные по рудам большинства месторождений были взяты



**Рис. 1.** Месторождения РЗЭ, данные по которым использованы в исследовании: 1 – Африканда, 2 – Амба-Донгар, 3 – Ашрам, 4 – Баян-Обо, 5 – Бзар-Лодж (карбонатит), 6 – Клэй-Хауэллс, 7 – Далуцао, 8 – Элк-Крик, 9 – Фен, 10 – Гакара, 11 – Хойдас-Лэйк, 12 – Камта, 13 – Канганкунде, 14 – Карасутское, 15 – Каррат, 16 – Ханнешин, 17 – Хотгор, 18 – Кызылджарен, 19 – Лавернь, 20 – Лонгонжу (карбонатит), 21 – Мюнопин, 22 – Мюя, 23 – Монвиель, 24 – Маунтин-Пасс, 25 – Мулохжай, 26 – Мулгия-Худай, 27 – Намсе, 28 – Нолане-Бор, 29 – Какарсуук, 30 – Сарфарток, 31 – Селигдар, 32 – Сонгве, 33 – Сент-Опорэ, 34 – Шторквил, 35 – Тайпинчжэнь, 36 – Твихина, 37 – Вейшань, 38 – Улчида, 39 – Вигу-Хилл, 40 – Янгибана, 41 – Араша, 42 – Бзар-Лодж (лагерит), 43 – Белозиминское, 44 – Каталан I, 45 – Чуктуконое, 46 – Камминс-Рэндж, 47 – Донг-Пао, 48 – Гленовер, 49 – Кийское, 50 – Лонгонжу (лагерит), 51 – Мабун, 52 – Маунт-Уэлд Дункан, 54 – Мрима-Хилл, 55 – Нуалла, 56 – Морру-ду-Ферру, 57 – Сейс-Лагос, 58 – Томгор, 59 – Шилуву, 60 – Зандкопсдрифт, 61 – Хибинская группа, 62 – Кипава-Лэйк, 63 – Квансфельд, 64 – Ловозерское (РЗЭ-Та-Nb), 65 – Ловозерское (Zr-РЗЭ), 66 – Моффелдт-Ариес, 67 – Нечалачо-Базальное, 68 – Нечалачо-Верхнее, 69 – Норра-Черр, 70 – Соренсен, 71 – Танбрез, 72 – Зона 3, 73 – Азовское, 74 – Джебель-Хамра, 75 – Пахарита, 76 – Тунги, 77 – Ту-Том, 78 – Баэрчжэ, 79 – Бокан, 80 – Брокман, 81 – Кристмас-Доум, 82 – Деберт-Лэйк, 83 – Фокстрот, 84 – Гурайя, 85 – Халзан-Буретгей, 86 – Джебель-Сайд, 87 – Джебель-Гувалах, 88 – Кагугинское, 89 – Кутессай II, 90 – Питинга, 91 – Стрэйндж Лэйк (пегматит), 92 – Стрэйндж Лэйк (гранит), 93 – Мэри-Кэглин, 94 – Олимпик-Дэм, 95 – Стенкампскраал, 96 – Шин-Куен, 97 – Алсе-Лэйк, 98 – Олсерум, 99 – Лофдал, 100 – Браунс-Рэндж, 101 – Бхмилпагнам, 102 – Чанаклы, 103 – Кэйпи, 104 – Чарли-Крик, 105 – Чаграпур, 106 – Эллиот-Лэйк, 107 – Магарака, 108 – Фингербордс, 109 – Фолкетон-Уэст, 110 – Грин-Коув-Спрингс, 111 – Джангардап, 112 – Норт-Стрэдброк, 113 – Рамакришна, 114 – Сири, 115 – Титан, 116 – ВИМ-150, 117 – Йоганап, 118 – Чуңцо, 119 – Гуандун С3, 120 – Гуандун ЮВ, 121 – Луннань, 122 – Макууту, 123 – Серра-Верде, 124 – Танталус, 125 – Синьфэн-1, 126 – Синьфэн-2, 127 – Сюньу.

[Fig. 1. REE deposits, data about which were used in the study: (1) – Afrikanda, (2) – Amba Dongar, (3) – Ashram, (4) – Bayan Obo, (5) – Bear Lodge (carbonatite), (6) – Clay–Howells, (7) – Dalucao, (8) – Elk Creek, (9) – Fen, (10) – Gakara, (11) – Hoidas Lake, (12) – Kamtha, (13) – Kangankunde, (14) – Karasugskoe, (15) – Karrat, (16) – Khanneshin, (17) – Khotgor, (18) – Kizilcaoren, (19) – Lavergne, (20) – Longonjo (carbonatite), (21) – Maoniuping, (22) – Miaoya, (23) – Montviel, (24) – Mountain Pass, (25) – Muluozhai, (26) – Mushgia Khudag, (27) – Nam Xe, (28) – Nolans Bore, (29) – Qaqarsuk, (30) – Sarfartoq, (31) – Seligdar, (32) – Songwe, (33) – St. Honoré, (34) – Storkwitz, (35) – Taipingzhen, (36) – Twihinat, (37) – Weishan, (38) – Wicheeda, (39) – Wigu Hill, (40) – Yangibana, (41) – Araxa, (42) – Bear Lodge (laterite), (43) – Beloziminskoe, (44) – Catalao I, (45) – Chuktukonskoe, (46) – Cummins Range, (47) – Dong Pao, (48) – Glenover, (49) – Kiyskoe, (50) – Longonjo (laterite), (51) – Mabounie, (52) – Mount Weld CLD, (53) – Mount Weld Duncan, (54) – Mrima Hill, (55) – Ngualla, (56) – Morro do Ferro, (57) – Seis Lagos, (58) – Tomtor, (59) – Xiluvo, (60) – Zandkopsdrift, (61) – Khibina group, (62) – Kipawa Lake, (63) – Kvanefjeld, (64) – Lovozerskoe (REE–Ta–Nb), (65) – Lovozerskoe (Zr–REE), (66) – Motzfeldt–Aries, (67) – Nechalacho Basal, (68) – Nechalacho Upper, (69) – Norra Karr, (70) – Sorensen, (71) – Tanbreez, (72) – Zone 3, (73) – Azovskoe, (74) – Jabal Hamra, (75) – Pajarita, (76) – Toongi, (77) – Two Tom, (78) – Baerzhe, (79) – Bokan, (80) – Brockman, (81) – Christmas Dome, (82) – Debert Lake, (83) – Foxtrot, (84) – Ghurayyah, (85) – Halzan Buregtei, (86) – Jabal Sayid, (87) – Jabal Tawlah, (88) – Katuginskoe, (89) – Kutessay II, (90) – Pitinga, (91) – Strange Lake (pegmatite), (92) – Strange Lake (granite), (93) – Mary Kathleen, (94) – Olympic Dam, (95) – Steenkampskraal, (96) – Sin Quyen, (97) – Alces Lake, (98) – Olserum, (99) – Lofdal, (100) – Browns Range, (101) – Bhimlipatnam, (102) – Canakli, (103) – Capel, (104) – Charley Creek, (105) – Chatrapur, (106) – Elliot Lake, (107) – Mataraca, (108) – Fingerboards, (109) – Folkston West, (110) – Green Cove Springs, (111) – Jangardup, (112) – North Stradbroke, (113) – Ramakrishna, (114) – Siri, (115) – Titan, (116) – WIM 150, (117) – Yoganup, (118) – Chongzuo, (119) – Guangdong NW, (120) – Guangdong SE, (121) – Longnan, (122) – Makuutu, (123) – Serra Verde, (124) – Tantalus, (125) – Xinfen 1, (126) – Xinfen 2, (127) – Xunwu.]

или непосредственно из технических докладов компаний, размещенных на их сайтах, или на сайте [www.sedar.com](http://www.sedar.com), где многие компании хранят документы для публичного доступа. Также использованы сведения из обзорных публикаций, где эти данные были интегрированы в соответствующие тематические выборки по странам, регионам и т.п. [11, 12, 27, 28]. По остальным месторождениям, в основном китайским, данные были получены из научных публикаций в результате усреднения представительных выборок анализов руд. Такой метод оказался вполне приемлемым для нашего исследования: ни один из объектов, для которых использованы академические, а не геологоразведочные данные, не продемонстрировал аномальные характеристики в своем типе.

Данные по содержаниям РЗЭ в технических документах обычно представлены как концентрации оксидов трехвалентных катионов ( $\text{Ln}_2\text{O}_3$ ), но для Ce, Pr и Tb в некоторых источниках – в формате  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  и  $\text{Tb}_4\text{O}_7$  соответственно. В научных публикациях были встречены как оба этих варианта представления данных, так и концентрации элементов, а не их оксидов. Для проведения сравнительного анализа в данном исследовании все содержания РЗЭ были пересчитаны на их элементарные формы, по которым рассчитывалась относительная доля каждого элемента в сумме РЗЭ в рудах соответствующего месторождения. На основании именно таких данных построены треугольные диаграммы в системах « $\text{Ln}_{\text{Ce}} - \text{Y} - \text{Ln}_{\text{Y}}$ » и « $\text{La} + \text{Ce} + \text{Sm} - \text{Pr} + \text{Nd} - \text{Ln}_{\text{Y}} + \text{Y}$ », анализ которых и стал основой статьи.

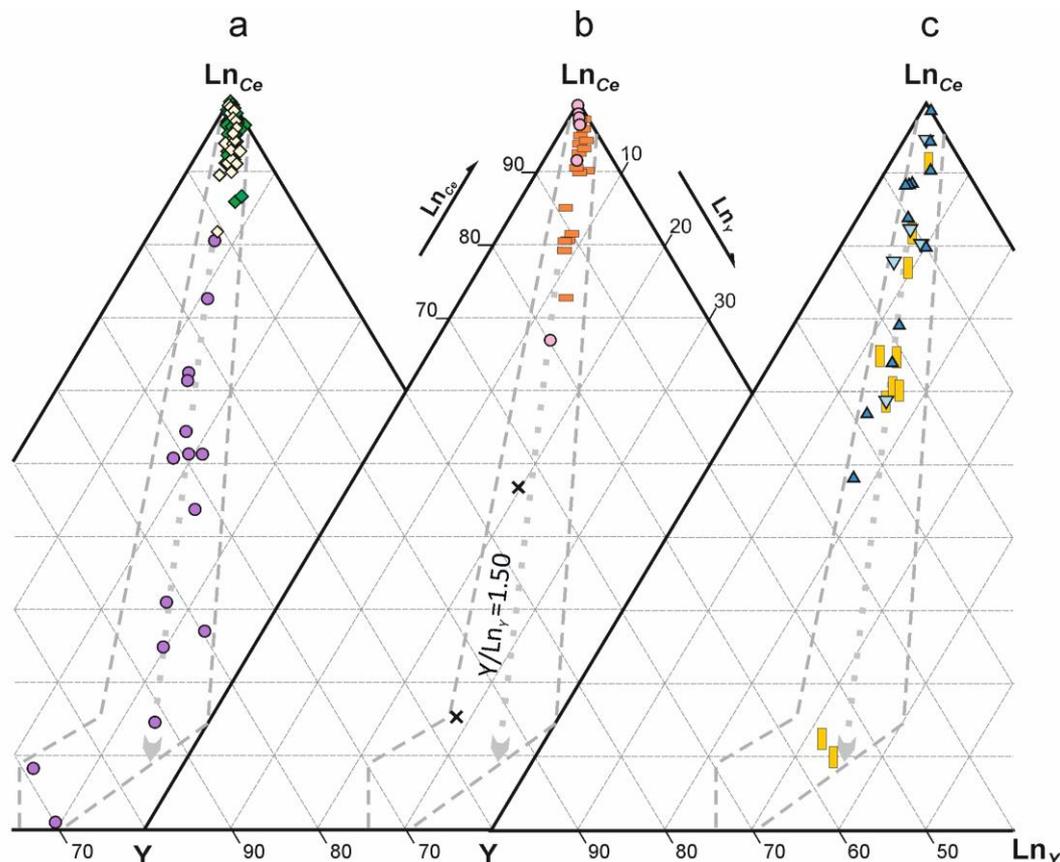
Месторождения РЗЭ в созданной авторами выборке представляют девять металлогенических типов: карбонатитовый (40 объектов), гипергенный в карбонатитах (20), фойдитный (12), сиенитовый (5), щелочногранитный (15), субщелочногранитный (6), ионно-адсорбционный (10), россыпной (17) и внутриразломный (2). Их характерные особенности кратко описаны ранее [29].

### Результаты анализа и их обсуждение Диаграмма « $\text{Ln}_{\text{Ce}} - \text{Y} - \text{Ln}_{\text{Y}}$ »

Месторождения разных типов заняли на диаграмме поля, имеющие взаимные перекрытия вплоть до полных. Поэтому для облегчения восприятия полученных результатов диаграмма построена трижды с меняющимся набором типов месторождений, но с вынесением на каждую часть тройной диаграммы интегрального контура распространения всех типов (Рис. 2а-с).

В левом сегменте этой триады (Рис. 2а) размещены месторождения карбонатитового, гипергенного в карбонатитах и щелочногранитного типов, которые в сумме составляют более половины всего списка выборки. Эти три типа в своей совокупности максимально заполняют пространство интегрального контура, протягиваясь с очень небольшими пространственными разрывами от вершины « $\text{Ln}_{\text{Ce}}$ » до стороны « $\text{Y} - \text{Ln}_{\text{Y}}$ » в районе диаграммной координаты 0%  $\text{Ln}_{\text{Ce}}$  / 70 %  $\text{Y}$  / 30 %  $\text{Ln}_{\text{Y}}$ . Однако в пространственном положении точек разных типов месторождений есть различия, вплоть до принципиальных.

Почти все объекты карбонатитового типа очень плотно разместились в интервале значений 90–100 %  $\text{Ln}_{\text{Ce}}$ , т.е. вблизи одноименной вершины, и только два объекта немного выходят за эти рамки (86–87 %). Практически идентично размещение месторождений гипергенного типа в карбонатитах, но «отскок» здесь один ( $\text{Ln}_{\text{Ce}}=81.6$  %). Это свидетельствует о том, что новообразованные гипергенные руды в карбонатитовых комплексах принципиально не изменяют соотношение  $\text{Ln}_{\text{Ce}}$  и  $\text{Ln}_{\text{Y}} + \text{Y}$  относительно своих гипогенных аналогов. Известно, что глубокий гипергенез сопровождается перемещением в пространстве огромных объемов вещества, включая рудообразующие элементы, и протекает при явной дифференциальной подвижности разных РЗЭ в развивающейся коре выветривания [15, 30]. Однако эти изменения в соотношениях рассматриваемых групп РЗЭ недостаточно велики, чтобы найти более яркое выражение в изменении специализации гипергенных руд относительно их гипогенных аналогов.



**Рис. 2.** Распределение месторождений РЗЭ на диаграмме «LnCe – Y – LnY». Обозначения типов месторождений идентично рис. 1. Пунктирной линией обозначен суммарный контур размещения всех месторождений выборки, использованной в анализе. Стрела маркирует значение 1.5 для отношения Y/LnY в рудах.

**[Fig. 2.** Distribution of REE deposits on the "LnCe - Y - LnY" diagram. Designations of deposit types are identical to Fig. 1. The dotted line indicates the total contour of the location of all deposits in the sample used in the analysis. The arrow marks the value 1.5 for the Y/LnY ratio in ores.]

Данное предположение подтверждают и сведения по двум месторождениям из выборки, где ресурсы РЗЭ оценены отдельно как в первичных гипогенных рудах, так и латеритных рудах – Бэар-Лодж (96.7 % против 95.2 % LnCe соответственно) и Лонгонжу (95.0% против 93.7 %). И в том, и в другом случае имеет место уменьшение доли LnCe в рудах их кор выветривания в пределах 1.5 %. Из-за того, что величина всей этой доли в первичных рудах в обоих случаях >90 %, такое ее изменение на диаграмме малозаметно.

LnY и Y почти во всех объектах, где их совокупная доля в сумме РЗЭ не превышает 10 %, представляют ничтожный коммерческий интерес. Это подавляющее большинство месторождений рассматриваемых двух типов в карбонатах. Только в единичных месторождениях данных типов, имеющих очень богатые руды (5–10 % суммы РЗЭ, как, например, в Маунт-Уэлд и Томторе), даже небольшие доли LnY+Y в 3–10 % от суммы РЗЭ могут быть экономически привлекательными. В тех редких случаях, когда руды месторождений этих типов содержат LnY+Y с долей 13–19 % (Рис. 2а), интерес к их извлечению будет непременно присутствовать. Однако, в любом случае, не этот интерес является определяющим для принципиальной эконо-

мической оценки каждого из них: в месторождениях данного типа экономическое значение лантаноидов цериевой группы всегда будет на первом месте.

За пределами ареала месторождений двух типов в карбонатах («карбонатитовое поле») все остальное пространство интегрального контура на этом фрагменте общей диаграммы занимают месторождения щелочногранитного типа (Рис. 2а), которые могут быть связаны как с интрузивными массивами щелочных гранитов, так и, в ряде случаев, с субвулканическими телами или эффузивными комплексами комендит-пантеллеритового состава [29]. Такое размещение их точек на диаграмме показывает, что данный тип в гораздо большей степени, чем объекты «карбонатитового поля», специализированы на РЗЭ иттриевой группы. Более того, почти во всех описаниях руд из месторождений щелочногранитного типа, попавших в анализируемую выборку (технических докладах, ASX-сообщениях и/или исследовательских статьях), обращается внимание на то, что даже при относительно низких содержаниях в них суммы РЗЭ они имеют коммерческую привлекательность именно благодаря повышенной (вплоть до доминирующей) доли иттриевых РЗЭ. На большей части своего ареала на

диаграмме эти месторождения размещены вдоль линейного тренда со средним коэффициентом  $Y/Ln_Y = 1.50$  в диапазоне частных значений 1.30–1.72 с единственным отклонением до 1.17 (Рис. 2а). Среднее значение этого коэффициента у двух точек в самой нижней части области ( $Ln_{Ce} < 9\%$ ) скачкообразно вырастает до 2.66 (2.36–2.96), т.е. в месторождениях с такой малой долей  $Ln_{Ce}$  преобладание  $Y$  в рудах максимально над всеми группами лантаноидов и является предельным для всей выборки. Это хорошо выражено в форме соответствующей части интегрального контура месторождений РЗЭ в координатах  $Ln_{Ce}-Y-Ln_Y$ : исключительно из-за этих двух объектов контур имеет резкое отклонение в сторону вершины угла  $Y$  (Рис. 2а).

В центральном сегменте анализируемой диаграммы размещены месторождения субщелочногранитного, рассыпного и внутриразломного типов (Рис. 2б). Почти все объекты субщелочногранитного типа находятся в рамках «карбонатитового поля». Исключением является месторождение Олсерум ( $Ln_{Ce}=66.9\%$ ). Оно единственное в своем типе испытало глубокую регенерацию в условиях регионального метаморфизма амфиболитовой фации и мигматизации, что, вероятно, стало причиной заметного увеличения в рудах роли новообразованного ксенотима, богатого  $Ln_Y$  и  $Y$ , при сохранившемся, но ставшем менее выразительным доминировании монацита [31]. В списках основных рудообразующих минералов других месторождений субщелочногранитного типа нашей выборки нет ни ксенотима, ни других принципиальных концентратов РЗЭ иттриевой группы.

Россыпные месторождения занимают на диаграмме почти то же поле значений, что и субщелочногранитный тип. При том, что их распределение в этом поле более равномерное, некоторая кластеризация здесь также присутствует. Первая группа месторождений, наиболее многочисленная, находится в интервале значений  $Ln_{Ce} > 89\%$ , т.е. в «карбонатитовом поле». Другая группа, включающая около трети объектов выборки данного типа, расположилась в интервале значений  $85\% \geq Ln_{Ce} \geq 73\%$ . Эта кластеризация совсем не случайна: именно во второй группе отмечено повышенное содержание в песках ксенотима (15–25% от его суммы с монацитом). В отличие от объектов первого кластера, такие россыпи могут быть использованы для извлечения в значимых объемах РЗЭ не только цериевой, но и иттриевой группы. Более того, почти всегда высокий уровень ториеносности монацита в  $Ti-Zr$ -РЗЭ россыпях сильно снижает их реальную привлекательность как промышленного источника РЗЭ. Поэтому в большинстве случаев из них извлекают только минералы  $Ti$  и  $Zr$ . Наличие разработанных в последнее десятилетие технологий выделения из рудоносных песков ксенотима в индивидуальный концентрат без существенной примеси монацита [32–34] позволяет изначально рассматривать такие комплексные россыпи как привлекательный источник дефицитных РЗЭ иттриевой группы, не отягощенный большим грузом экологических проблем, связанных с

торием в монаците. В тех же случаях, когда ториевая проблема в монаците при разработке россыпей успешно решается, как например, в Индии, имеющей государственный проект по ториевой энергетике [35], из таких месторождений возможно получение полного или всего желаемого спектра РЗЭ.

Месторождения РЗЭ внутриразломного типа встречаются очень редко. Авторам известны только два примера (Рис. 1), оба – протерозойского возраста. На диаграмме “ $Ln_{Ce} - Y - Ln_Y$ ” они разместились в поле составов с преобладанием тяжелых РЗЭ (Рис. 2б). Примечательно, что в рудовмещающих комплексах этих месторождений ни одна из пород любого генезиса (магматического, осадочного, метаморфического) и возраста, даже совпадающего (в пределах ошибки) с возрастом рудообразования, не имеет никаких признаков обогащения иттриевыми РЗЭ относительно цериевых. Например, на месторождении Лофдаль, которое по формальным признакам чаще всего относят к карбонатитовому типу, т.к. все руды локализованы в жильном ореоле одноименного комплекса, все зоны минерализации, обогащенные тяжелыми РЗЭ, установлены только в тех карбонатитовых жилах, которые тектонически расщеплены, и в этих зонах расщепления метасоматически изменены с появлением новообразованного ксенотима [36]. Минерализованные ксенотимом зоны могут выходить далеко за пределы карбонатитовых жил во вмещающие породы, а также находиться в зонах расщепления без карбонатитовых жил. Нерасщепленные карбонатитовые жилы имеют обычный для карбонатитов профиль РЗЭ с явным доминированием цериевой группы. Изотопно-геохимические исследования показали, что появление ксенотимовой минерализации связано с деятельностью растворов метеорной, а не гипогенной природы [36].

На другом месторождении внутриразломного типа, Браунс-Рэндж, ксенотимовые руды локализованы в тектонических зонах, наложенных на комплекс метатерригенных пород [37]. Магматических пород близко к рудной минерализацией возраста в районе нет. Изотопно-геохимические исследования этого месторождения, как и в случае Лофдаль, показали ключевую роль в рудообразовании метеорных вод [37].

Правый сегмент диаграммы содержит месторождения фойдного, сиенитового и ионно-адсорбционного типов (Рис. 2с). В фойдном типе отчетливо разделение на два вытянутых по форме кластера:  $Ln_{Ce} \geq 79.5\%$  и  $69\% \geq Ln_{Ce} \geq 48\%$ . Отличительной особенностью всех месторождений второго кластера является ведущая роль в концентрировании РЗЭ минералов группы эвдиалита (далее – эвдиалит). В рудах месторождений первого кластера эвдиалит или отсутствует, или малозначим в общем балансе РЗЭ. Поэтому  $Ln_Y+Y$  в рудах месторождений фойдного типа представляют главный интерес только при доминировании эвдиалита.

Месторождения фойдного типа из первого кластера ( $Ln_{Ce} \geq 79.5\%$ ) не специализированы на  $Ln_Y+Y$ , но

их руды намного чаще, чем, например, в карбонатитовых месторождениях, могут представлять интерес для попутного извлечения. Особенно отметим месторождение Нечалачо-Базальное [38], демонстрирующее максимальную в этом кластере долю  $Ln_{Y+Y}=20.4\%$  (Рис. 2в), что сопоставимо с некоторыми представителями щелочногранитного типа (Рис. 1а), но с еще более коммерчески привлекательным отношением  $Y/Ln_Y=1$  против 1.5, т.к. любой лантаноид иттриевой группы имеет более высокую стоимость на мировом рынке, чем сам иттрий (табл. 1).

Двухкластерное распределение месторождений сиенитового типа принципиально не отличается от фойдитового типа, но менее ясно выражено по причине намного меньшего количества известных объектов (Рис. 2с). Сравнение становится еще более уместным, если указать, что в рудах единственного объекта в сиенитовом типе (Пахарит), попавшего в “эвдиалитовый” кластер фойдитового типа, также доминирует эвдиалит. В рудах остальных месторождений в сиенитах эвдиалит или отсутствует, или намного менее значим.

Месторождения типа «ионных глин» разделились на несколько кластеров в разных частях интегрального контура всей выборки. При этом только один кластер является относительно многочисленным, сосредоточив половину всех объектов типа в узком интервале  $65\% \geq Ln_{Ce} \geq 60\%$  (Рис. 2с). Остальные месторождения разделились еще на три группы по 1–2 объекта как с намного меньшими, так и с большими значениями этого показателя. В целом преобладают руды с повышенной и высокой долей  $Ln_{Y+Y}$ . Руды месторождений ионно-адсорбционного типа во многом наследуют геохимический профиль РЗЭ от субстрата (например, гранитов) по которому развивается материнская кора выветривания. При этом исследователи отмечают две новообразованные в сравнении с субстратом черты геохимических профилей РЗЭ «ионных глин»: очень заметное относительно других РЗЭ обеднение церием и наличие вертикальной зональности, заключающейся в повышении доли  $Ln_{Y+Y}$  внизу зоны латеритизации [39, 40]. В результате при необходимости появляется возможность селективной отработки той части профиля выветривания, которая имеет самое экономически выгодное сочетание разных РЗЭ.

#### Диаграмма «La+Ce+Sm – Pr+Nd – Ln<sub>Y+Y</sub>»

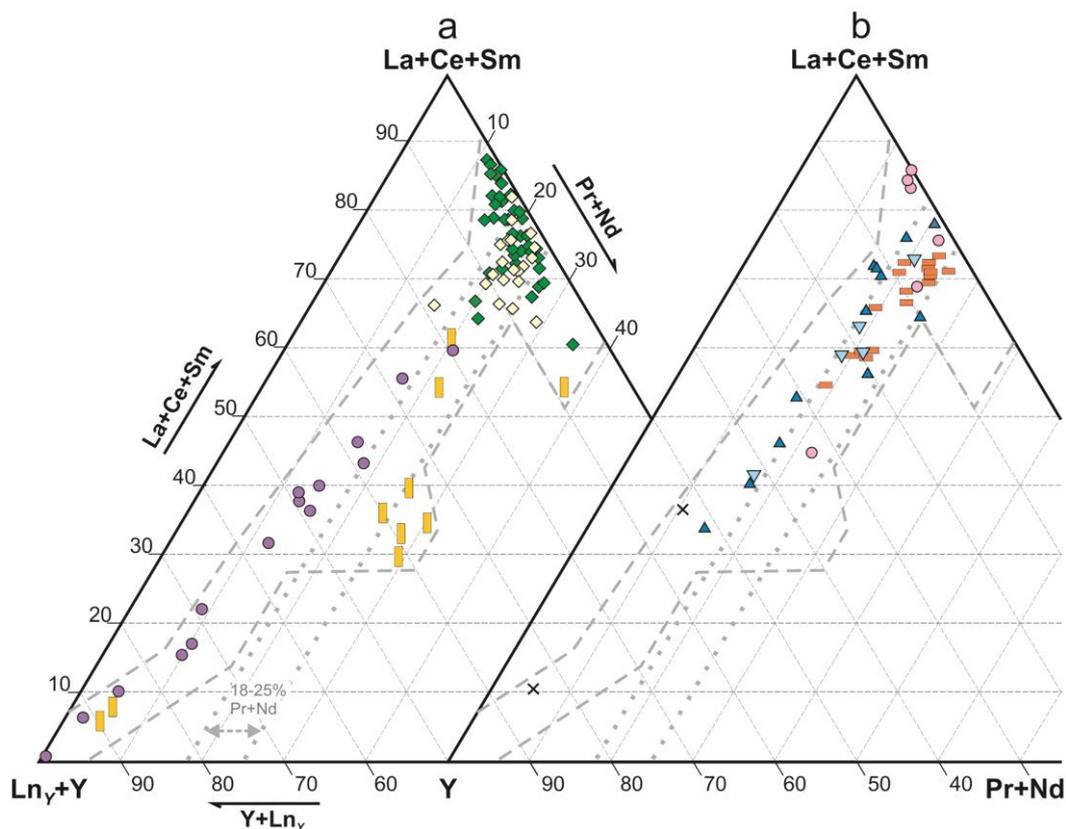
Эта диаграмма позволяет, прежде всего, оценить перспективность разных типов месторождений на наличие привлекательных концентраций наиболее дефицитных легких лантаноидов Pr и Nd. Для наглядного представления результатов оказалось достаточным разделить диаграмму не на три, а всего на две части, ввиду того, что в координатах «La+Ce+Sm – Pr+Nd – Ln<sub>Y+Y</sub>» различия между рудами разных типов месторождений РЗЭ оказались более контрастными, чем в случае диаграммы «Ln<sub>Ce</sub> – Y – Ln<sub>Y</sub>». Для облегчения сравнения на каждую часть двойной диа-

граммы вынесен интегральный контур распространения всех объектов анализируемой выборки (Рис. 3а, б). На диаграмме также показан “коридор” значений 18–25 % (Pr+Nd). Он установлен из анализа технических докладов по результатам геологоразведочных работ на месторождениях РЗЭ. Значения этого параметра <18% характерны для рядовых по этому показателю руд, и в соответствующих технических докладах акцент на присутствие этих элементов не делается. Руды со значениями внутри интервала 18–25 % рассматриваются геологоразведочными компаниями при экономической оценке запасов как позитивный фактор, увеличивающий шансы его освоения в обозримом будущем. Значения выше 25 % заставляют компании максимально концентрироваться на использовании именно этого достоинства руд, ориентируя на него и подсчет запасов, и схемы обогащения, и технологии извлечения РЗЭ, обеспечивая тем самым максимальную рентабельность эксплуатации объекта.

В левой части двойной диаграммы размещены месторождения тех типов, что принципиально определили форму интегрального контура для всей выборки в данных координатах (Рис. 3а). Этот контур имеет более сложную форму, чем его аналог на диаграмме “Ln<sub>Ce</sub> – Y – Ln<sub>Y</sub>”: генеральный линейный тренд распределения точек в данных координатах тоже присутствует, но он менее очевиден из-за наличия более значительных отклонений от него. Наиболее заметные отклонения от общего тренда наблюдаются на двух участках диаграммы.

Первый такой участок образован месторождениями карбонатитового типа, которые при самом компактном, по сравнению с другими типами, размещении по параметру  $Ln_{Y+Y}$  (<14%), имеют очень широкий разброс значений параметру Pr+Nd в интервале 11–35% (Рис. 3а). Причем все отклонения в обе стороны за пределы интервала 18–25% наблюдаются в рудах с низкими значениями  $Ln_{Y+Y} \leq 7\%$ . В результате интегральный контур имеет «раструб» в обе стороны от осевой области контура. При этом верхняя часть «раструба» (Pr+Nd<18%) имеет долю 39.5% в общем количестве объектов карбонатитового типа из анализируемой выборки. Нижнюю его часть, где оказались самые богатые по данному параметру месторождения (Pr+Nd>25%), образуют только 11.6% объектов этого же списка. Доля центральной части, соответственно, 48.8%.

Недавно опубликованные нами данные о распределении возрастов месторождений РЗЭ на оси геологического времени [29] позволяют увидеть некоторую эволюционную тенденцию для месторождений карбонатитового типа, попавших в разные части «раструба». Среди объектов, имеющих руды с (Pr+Nd)<18%, 81.3% образовались в мезозое–кайнозое, 6.3% – в протерозое, остальные – в палеозое. В группе месторождений с (Pr+Nd)=18–25% доля мезозойско-кайнозойских объектов снижается до 36.8%, а протерозойских увеличивается до 52.6%. Месторождения с (Pr+Nd)>25% имеют только протерозойский возраст.



**Рис. 3.** Распределение месторождений РЗЭ на диаграмме «La+Ce+Sm – Pr+Nd – LnY+Y». Обозначения типов месторождений идентично рис. 1 и 2. Пунктирной линией обозначен суммарный контур размещения всех месторождений выборки, использованной в анализе. Точечные линии ограничивают область составов с долей Pr+Nd 18–25 %.

**[Fig. 3.** Distribution of REE deposits on the diagram "La+Ce+Sm – Pr+Nd- LnY+Y". Designations of deposit types are identical to Figs. 1 and 2. The dotted line indicates the total contour of the location of all deposits in the sample used in the analysis. Dotted lines limit the area of compositions with e Pr+Nd 18–25%.]

Примечательно, что среди последних заметно преобладают месторождения, локализованные в линейно структурированных дайково-силловых и жильных карбонатитовых комплексах без проявлений карбонатитового магматизма центрально-концентрического типа. Самое высокое значение  $(Pr+Nd)=35.0$  в среднем составе руды зафиксировано на месторождении Янгибана (1.36 млрд лет), пока разведанного только в приповерхностной зоне окисления карбонатитовых даек и силлов. Частично выщелачивание карбонатов способствовало некоторому увеличению средних содержаний суммы редких земель в этих рудах, но не изменили там первичных соотношений РЗЭ: гипогенная монацитовая минерализация практически не затронута процессами переотложения под действием агентов гипергенеза [41].

Второй участок заметных отклонений от генерального линейного тренда на анализируемой диаграмме образуют месторождения ионно-адсорбционного типа, которые имеют еще более широкий диапазон значений Pr+Nd (Рис. 3а). В отличие от месторождений в карбонатитах, этот разброс наблюдается в очень широком диапазоне значений LnY+Y от 8.5 до 90 %. В рудах единственного месторождения ионно-адсорбционного типа с LnY+Y <10 % (Сюньбу) доля

Pr+Nd составляет 36.8 %, что максимально не только для этого типа, но и для всей анализируемой выборки. Месторождения с LnY+Y в интервале 18–24 % характеризуются почти таким же интервалом значений и для Pr+Nd (Рис. 3а). Наиболее многочисленный в данном типе кластер месторождений с  $42 \% >(LnY+Y) > 35 \%$  демонстрирует значения Pr+Nd в интервале 24–30 %. Данный кластер представлен месторождениями, в рудах которых имеет место наиболее низкое среднее значение отношения  $(La+Ce+Sm)/(Pr+Nd)$  около 1.3 при его величине по всему типу 1.7 и средними значениями по другим типам от 2.8 до 4.5. Прежде всего, это следствие бедности руд данного кластера церием, доля которого в них ниже не только доли лантана, но и неодима, а иногда и празеодима. Ни в одном другом типе месторождений столь глубокой отрицательной аномалии церия не наблюдается. Если к этому еще прибавить описанную выше информацию по особенностям распределения тяжелых РЗЭ (Рис. 2с), то можно констатировать, что в свете ценовой ситуации на разные РЗЭ на мировом рынке (табл. 1), этот кластер месторождений выделяется во всей анализируемой выборке, т.к. составляющие его объекты одновременно имеют очень высокие доли в общей сумме РЗЭ наиболее дорогостоящих

элементов как цериевой, так и иттриевой групп.

Ионно-адсорбционные месторождения, максимально богатые тяжелыми РЗЭ с  $(Ln_Y+Y)>85\%$ , имеют минимальную в своем типе долю Pr+Nd (Рис. 3а) и потому представляют крайне малый интерес для извлечения последних.

Месторождения гипергенного типа в карбонатах в основном попали в поле умеренно высоких значений  $(Pr+Nd)=18-25\%$ , только два из них – в зону более низких значений, и одно – в зону высоких значений параметра (Рис. 3а). Таким образом, в данном аспекте принципиальных отличий от гипогенных руд в карбонатах у них нет, но встретить среди таких гипергенных руд как крайне высокие, так и крайне низкие значения Pr+Nd менее вероятно, чем в их гипогенных аналогах.

Почти все месторождения щелочногранитного типа расположились в области рядовых для руд с неидеальной, но достаточно очевидной тенденцией к уменьшению в рудах относительной доли Pr+Nd с увеличением доли  $Ln_Y+Y$  (Рис. 3а). Только два месторождения этого типа попали внутрь зоны  $18-25\%$  вблизи ее нижнего граничного значения.

Вторая часть рассматриваемой диаграммы содержит точки месторождений фойидного, сиенитового, субщелочногранитного, россыпного и внутриразломного типов (Рис. 3б). У фойидного типа большинство месторождений (две трети), включая все с эвдиалитовыми рудами, также расположились вне коридора значений  $(Pr+Nd)=18-25\%$ , хотя некоторые из них очень близко к его нижнему лимиту. Точка единственного месторождения сиенитового типа с эвдиалитовым составом руды находится здесь же. Оставшаяся треть месторождений фойидного типа и большинство месторождений сиенитового типа попадают в интервал  $(Pr+Nd)=18-25\%$  (Рис. 3б), т.е. далеко не безынтересны для извлечения этих элементов. Максимальные значения в типе установлены в двух месторождениях расслоенного агапитового комплекса Нечалачо (Базальное –  $23.8\%$ , Верхнее –  $25.6\%$ ). Выше уже было упомянуто, что Базальное также имеет существенную долю  $Ln_Y+Y$  при очень привлекательном отношении  $Y/Ln_Y$ . Такой объект с формальной точки зрения (без учета горнотехнических, логистических и т.п. условий) оптимально соответствуем запросам современного рынка РЗЭ.

В субщелочногранитном типе месторождения выборки разделились пополам: объекты с монацитовыми ( $\pm$ ксенотим) рудами попали в зону умеренно высоких значений Pr+Nd, а с иным составом – в поле значений этого параметра  $<18\%$  (Рис. 3б).

Наконец, все месторождения в россыпях находятся в зоне умеренно высокой доли  $(Pr+Nd)=18-25\%$ , а все месторождения внутриразломного типа – в области рядовых по этому показателю руд (Рис. 3б).

### Заключение

Значительный объем выборки месторождений РЗЭ девяти металлогенических типов со всего мира

позволил впервые установить количественные границы в специализации месторождений этих типов как на традиционно выделяемые цериевую и иттриевую группы, так и на наиболее дефицитные в их ряду Pr+Nd и  $Ln_Y$ . Распределение последних на диаграммах « $Ln_{Ce} - Y - Ln_Y$ » и « $La+Ce+Sm - Pr+Nd - Ln_Y+Y$ » продемонстрировало как сходство некоторых типов в специализации руд на дефицитные группы РЗЭ, так и их непохожесть на другие типы (табл. 2). Вместе с тем, в ряде случаев в рудах месторождений даже одного металлогенического типа, но имеющих разный состав главных минералов-концентраторов РЗЭ, установлен большой разброс значений с тенденцией к их кластеризации.

Месторождения карбонатитового типа имеют очень ярко выраженную специализацию на цериевую группу лантаноидов. При этом около 60 % объектов данного типа в выборке характеризуются умеренно высокой ( $18-25\%$ ) или очень высокой ( $>25\%$ ) долей Pr+Nd в сумме РЗЭ. Это очень позитивный штрих для увеличения рентабельности переработки их руд и успешной реализации продукции на современном мировом рынке. В связи с этим, полезным для планирования геологоразведочных работ является наше наблюдение о том, что шансы на обнаружение руд с долей  $(Pr+Nd)\geq 18\%$  максимальны среди месторождений протерозойского возраста и минимальны среди месторождений мезозоя–кайнозоя. Доля иттриевых лантаноидов в рудах месторождений карбонатитового типа всегда небольшая, и их промышленное извлечение может быть целесообразным далеко не всегда, и только в дополнение к элементам цериевой группы.

Месторождения гипергенного типа в карбонатах имеют видимые, но совсем небольшие отличия во всех рассмотренных системах элементов от месторождений в карбонатитовых комплексах, слабо затронутых гипергенезом. Имеются все основания утверждать, что эти два типа принципиально не различаются в своей специализации на проанализированные группы РЗЭ.

По сравнению с двумя типами в карбонатах месторождения фойидного типа имеют меньший разброс значений доли Pr+Nd, но намного более значительный разброс для  $Ln_Y$  (табл. 2). В этом типе выделены две группы месторождений, различия которых объясняются минералогией руд. Если главные концентраторы РЗЭ в них – минералы группы эвдиалита, то они отчетливо профилированы на иттриевые РЗЭ с  $Y/Ln_Y$  в интервале  $1.5-2.0$ . Цериевые РЗЭ в таких месторождениях представляют много меньший интерес: доля  $Ln_{Ce}$  в них сопоставима или немного выше доли  $Ln_Y+Y$  при том, что показатель Pr+Nd относительно невысокий. Если же руды без эвдиалита, то они заметно беднее иттриевыми РЗЭ и поэтому могут в основном интересоваться как потенциальный источник элементов преимущественно цериевой группы, только иногда с заметной, но меньшей, чем в эвдиалитовых рудах, ролью  $Ln_Y$ .

**Табл. 2.** Относительные доли (%) дефицитных групп РЗЭ в месторождениях разных типов  
**[Table 2.** Relative shares (%) of deficient REE groups in deposits of different types]

Типы месторождений [Deposit types]	Дефицитные РЗЭ [Scarce REE]			Pr+Nd			Ln <sub>γ</sub>		
	мин. [min]	макс. [max]	сред. [mean]	мин. [min]	макс. [max]	сред. [mean]	мин. [min]	макс. [max]	сред. [mean]
Карбонатитовый [Carbonatitic]	11.2	35.0	19.4	0.4	7.6	2.2			
Гипергенный в карбонатитах [Hypergene in carbonatites]	15.2	28.9	21.4	0.6	7.7	3.4			
Фойдный [Foidic]	14.0	25.6	18.1	1.2	17.6	8.1			
Сиенитовый [Syenitic]	16.1	20.9	18.9	3.1	16.3	8.7			
Щелочногранитный [Alkali-granitic]	0.2	20.7	11.5	7.8	34.0	21.7			
Субщелочногранитный [Subalkali-granitic]	13.5	23.4	17.7	0.1	13.3	3.5			
Внутриразломный [Faul-hosted]	4.6	10.5	7.6	19.7	28.2	23.9			
Россыпной [Placers]	18.8	25.3	21.7	1.6	11.9	5.4			
Ионно-адсорбционный [Ion-adsorbtion]	4.2	36.8	22.3	4.5	34.2	16.3			

В сиенитовом типе имеются свои эвдиалитовые и безэвдиалитовые минеральные аналоги месторождений фойдного типа. Они попадают на проанализированных диаграммах в пределы тех же самых полей, тяготея к средним их частям. Поэтому их специализация на разные группы РЗЭ и коммерческая привлекательность должна характеризоваться аналогично.

В месторождениях щелочногранитного и внутриразломного типов первоочередной интерес представляют РЗЭ иттриевой группы, особенно Ln<sub>γ</sub> (табл. 2). Только в единичных месторождениях щелочногранитного типа с долей Ln<sub>ce</sub> близкой к 80% не менее значимыми являются РЗЭ цериевой группы, в т.ч. и из-за относительно высокой доли Pr+Nd. Все остальные представители этих типов относятся к рядовым по последнему параметру, и как значимый источник Pr и Nd рассматриваться не могут.

Субщелочногранитный тип проявлен тройственно. Руды таких месторождений в основном могут представлять интерес для извлечения цериевых лантаноидов, но при этом не всегда имеют высокую долю Pr+Nd. Однако если в составе руд доминирует монацит, эта доля будет всегда выше 18%. Кроме того, в регенерированных рудах единственного представителя типа, претерпевшем интенсивный метаморфизм и мигматизацию, имеются сопоставимые с монацитом концентрации ксенотима, а потому такой объект также интересен и для извлечения Y и Ln<sub>γ</sub>.

Активно разрабатываемые россыпные Ti-Zr месторождения практически всегда содержат промышленно значимые концентрации РЗЭ, которые имеют некоторые привлекательные особенности, но редко при этом извлекаются. В частности, имеется хороший баланс Pr+Nd с остальными РЗЭ, соответствующий

нуждам современного рынка. Этот баланс создается монацитом. Однако именно он одновременно создает «ториевую проблему». Вместе с тем, часть Ti-Zr-РЗЭ россыпей имеет также и заметные концентрации ксенотима, в связи с которым такая проблема не возникает. Причем, технологии его сепаратного извлечения уже разработаны. Поэтому такие месторождения, при наличии экономической целесообразности, могут использоваться для попутного получения концентратов очень богатых Ln<sub>γ</sub>+Y, являющихся в ксенотиме главными минералообразующими катионами.

Ионно-адсорбционный тип имеет самый широкий разброс по проанализированным параметрам, что связано с большим разнообразием исходной геохимической специализации по РЗЭ первичных субстратов, по которым развиваются рудоносные коры выветривания. Поэтому среди месторождений данного типа можно найти руды с самым разным соотношением Ln<sub>ce</sub> и Ln<sub>γ</sub>+Y. При этом месторождения с долей Ln<sub>ce</sub>>45 % всегда имеют и повышенную долю (Pr+Nd)>18 % вплоть до нередких очень высоких значений >25 %. В результате около половины известных месторождений типа являются в равной степени привлекательными для извлечения наиболее дефицитных редкоземельных элементов как в цериевой, так и иттриевой группах.

Полученные в данном исследовании результаты будут полезны в качестве источника объективных референтных данных при планировании и проведении прогнозно-металлогенических и поисково-оценочных работ, ориентированных на РЗЭ, а также при определении их прогнозных ресурсов и оценке возможности выявления среди прогнозируемых месторождений объектов, имеющих в сумме РЗЭ высо-

кие доли наиболее интересных для промышленности элементов.

*Конфликт интересов:* Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. 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 Geology Reviews*. 2021. Vol. 128. 103906. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103906
4. Audi G., Bersillon O., Blachot J., Wapstra A. H. The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties // *Nuclear Physics A*. 2003. Vol. 729 (1). P. 3–128. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2003.11.001
5. Rudnick R. L., Gao S. Composition of the continental crust // *Treatise on Geochemistry*. Vol. 3: Crust. Chap. 3.01 / Rudnick R.L., Holland H.D., Turekian K.K. – eds., Oxford: Elsevier and Pergamon. 2003. P. 1–64. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4
6. 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. Vol. 200. 104475. DOI: 10.1016/j.jseaes.2020.104475
7. Institute of Rare Earths and Strategic Metals site. URL: <https://ise-metal-quotes.com/> (дата обращения: 25.01.2023)
8. Chemcraft Ltd site. URL: [https://chemcraft.su/product/22955?field\\_packaging%5B0%5D=250](https://chemcraft.su/product/22955?field_packaging%5B0%5D=250) (дата обращения: 25.01.2023).
9. Adamas Intelligence. Rare earth elements: Market issues and outlook. Research report. 2019. 10 p. URL: <https://www.adamasintel.com/> (дата обращения: 25.01.2023).
10. Goodenough K. M., Wall F., Merriman D. The rare earth elements: Demand, global resources, and challenges for resourcing future generations // *Natural Resources Research*. 2018. Vol. 27 (2). P. 201–216. DOI: 10.1016/j.resourpol.2014.03.004
11. 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. Vol. 52. P. 134–153. DOI: 10.1016/j.resourpol.2017.02.002
12. Weng Z. H., Jowitt S. M., Mudd G.M., Haque N. A detailed assessment of global rare earth element resources: Opportunities and challenges // *Economic Geology*. 2015. Vol. 110. P. 1925–1952. DOI: 10.2113/econgeo.110.8.1925
13. 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. Vol. 41. P. 52–59. DOI: 10.1016/j.resourpol.2014.03.004
14. Wall F. Rare earth elements // G. Gunn – ed.: *Critical metals handbook*. London: Wiley. 2014. P. 312–339. DOI: 10.1002/9781118755341.ch13
15. Лапин А. В., Толстов А. В., Плошко В. В., Чемизова Л. Н., Сорокина Т. И. Минерогения кор выветривания карбонатитов. М.: ГЕОС. 2011. 308 с.
16. Dostal J. Rare metal deposits associated with alkaline/peralkaline igneous rocks // *Reviews in Economic Geology*. Vol. 18. 2016. P. 33–54. DOI: 10.5382/Rev.18.02
17. Linnen R. L., Samson I. M., Williams-Jones A. E., Chakhmouradian A. R. Geochemistry of the rare-earth element, Nb, Ta, Hf, and Zr deposits // H.D. Holland, K.K. Turekian – eds.: *Treatise on Geochemistry* (2nd Edition). Chapter 13.21. Amsterdam: Elsevier. 2014. P. 543–568. DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.01124-4
18. Sanematsu K., Watanabe Y. Characteristics and genesis of ion adsorption-type rare earth element deposits // *Rare earth and critical elements in ore deposits. Reviews in Economic Geology*. Vol. 18. 2016. P. 55–80. DOI: 10.5382/Rev.18.03
19. Sengupta D., Van Gosen B. S. Placer-type rare earth element deposits // *Rare earth and critical elements in ore deposits // Reviews in Economic Geology*. Vol. 18. 2016. P. 81–100. DOI: 10.5382/Rev.18.04
20. Verplanck P. L., Mariano A. N., Mariano A.J r. Rare earth element ore geology of carbonatites // *Rare earth and critical elements in ore deposits // Reviews in Economic Geology*. Vol. 18. 2016. P. 5–32. DOI: 10.5382/Rev.18.01
21. Wang Z.-Y., Fan H.-R., Zhou L., Yang K.-F., She H.-D. Carbonatite-related REE deposits: an overview // *Minerals*. 2020. Vol. 10. 965. DOI:10.3390/min10110965
22. Balaram V. Rare earth elements: a review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact // *Geoscience Frontiers*. 2019. Vol. 10 (4). P. 1285–1303. DOI: 10.1016/j.gsf.2018.12.005
23. 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 Geology Reviews*. 2020. Vol. 122. 103521. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103521
24. Simandl G. J. Geology and market-dependent significance of rare earth element resources // *Mineralium Deposita*. 2014. Vol. 49. P. 889–904. DOI: 10.1007/s00126-014-0546-z
25. Voncken J. H. L. The rare earth elements: an introduction. SpringerBriefs in earth sciences. SpringerNature. 2016. 127 p. DOI: 10.1007/978-3-319-26809-5
26. Zhou B., Li Z., Chen C. Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies // *Minerals*. 2017. Vol. 7. 203. DOI: 10.3390/min7110203
27. Сердюк С. С., Ломаев В. Г., Кузьмин В. И., Пашков Г. Л., Шабанов В. Ф., Павлов В. Ф., Мамонов С. Н. Красноярский кластер – стратегический приоритет развития редкометалльной промышленности России // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технология*. 2015. Т. 8. № 7. С. 816–834. DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-7-816-834
28. Friedrichs P., Meyer F. M. REE database management system: Evaluation of REE deposits and occurrences // *J. Sustainable Metallurgy*. 2017. Vol. 3. P. 13–31. DOI: 10.1007/s40831-016-0077-1
29. Ткачев А. В., Рундквист Д. В., Вишневецкая Н. А. Основные черты исторической металлогении редкоземельных элементов // *Геология рудных месторождений*. Т. 64. № 3. С. 209–246. DOI: 10.31857/S0016777022030066
30. 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. Vol. 11. 4386. DOI: 10.1038/s41467-020-17801-5
31. Andersson S. S., Wagner T., Jonsson E., Fusswinkel T., Leijd M., Berg J. T. Origin of the high-temperature Olserum-Djupedal REE-phosphate mineralisation, SE Sweden: A unique contact metamorphic-hydrothermal system // *Ore Geology Reviews*. 2018. Vol. 101. P. 740–764. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.08.018
32. Chelgani S. C., Rudolph M., Leistner T., Gutzmer J., Peuker U. A. A review of rare earth minerals flotation: Monazite and xenotime // *International J. Mining Science and Technology*. 2015. Vol. 25. I. 6. P. 877–883. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.09.002
33. Jordens A., Cheng Y. P., Waters K. E. A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals // *Minerals Engineering*. 2013. Vol. 41. P. 97–114. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.10.017
34. Zhu Z., Pranolo Y., Cheng C. Y. Separation of uranium and thorium from rare earths for rare earth production—a review // *Minerals Engineering*. 2015. Vol. 77. P. 185–196. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.03.012
35. Singh Y. Rare earth element resources: Indian context. Springer Nature Switzerland. 2020. 395 p. DOI: 10.5382/econgeo.115.8.br01
36. Do Cabo V. N. Geological, mineralogical and geochemical characterisation of the heavy rare earth-rich carbonatites at Lofdal, Namibia. PhD thesis. UK, University of Exeter. 2013. 548 p. URL: <https://ore.exeter.ac.uk/repository/handle/10871/15034> (дата обращения: 22.03.2023)
37. Nazari-Dehkordi T., Spandler C., Oliver N. H. S., Wilson R. Unconformity related rare earth element deposits: A regional-scale hydrothermal mineralization type of northern Australia // *Economic Geology*. 2018. Vol. 113. P. 1297–1305. DOI:10.5382/econgeo.2018.4592
38. Möller V., Williams-Jones A. E. Stable and radiogenic isotope constraints on the magmatic and hydrothermal evolution of the Nechalacho Layered Suite, northwest Canada // *Chemical Geology*. 2016. Vol. 440. P. 248–274. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2016.07.010
39. 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. Vol. 148. P. 65–95. DOI: 10.1016/j.jseaes.2017.08.004
40. 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. Vol.1 (3). P. 415–424. DOI: 10.31035/cg2018022
41. Slezak P., Spandler C., Border A., Whittock K. Geology and ore genesis of the carbonatite-associated Yangibana REE district, Gascoyne Province, Western Australia // *Mineralium Deposita*. 2021. Vol. 56. P. 1007–1026. DOI: 10.1007/s00126-020-01026-z

## **Specialisation of rare earth deposits according to the elemental composition of their ores**

©2023 A. V. Tkachev✉, N. A. Vishnevskaya, E. I. Chesalova

*Vernadsky State Geological Museum RAS (SGM RAS),  
11 Mokhovaya ul., building 11, Moscow, 125009, Russian Federation*

### **Abstract**

*Introduction:* The scale of the use of rare earth elements (REE) by industry in the 21st century increases at a high rate. However, the demand for individual rare earth elements increases unevenly: for some elements, the increase in demand is very high, for others it is less significant or absent. Due to disproportions between the capabilities of the currently used resource base and the consumption of individual REE, prices for scarce praseodymium (Pr), neodymium (Nd) and heavy lanthanides (LnY) are 1–2 orders of magnitude higher than for other rare earth elements. The importance of these elements for both traditional and innovative sectors of modern industry makes them not just scarce, but critical. Therefore, exploration companies around the world consider the discovery of deposits with an increased proportion of deficient REE as a big bonus. At the same time, at the initial stage, work is often carried out without a preliminary strategy, since in the scientific and methodological literature, there are no empirically substantiated data on possible variations in the fluctuations in the ratios between scarce and non-deficient REE in deposits of different types. Our study aims to correct such situation.

*Data and analysis methodology:* Data on the distribution of REE in ores from 127 REE deposits from all over the world have been collected and compared for the first time. The deposits represent nine metallogenic types that have attracted interest from exploration or mining companies in recent decades.

*Results and Discussion:* Possible ranges of values were established for the relative shares (%) of deficient REE groups (Pr+Nd min–max/mean; LnY min–max/mean) in ores of deposits of the following metallogenic types: carbonatite (11.2–35.0/19.4; 0.4–7.6/2.2), hypergene in carbonatites (15.2–28.9/21.4; 0.6–7.7/3.4), foid (14.0–25.6 /18.1; 1.2–17.6/8.1), syenite (16.1–20.9/18.9; 3.1–16.3/8.7), alkaline granite (0.2–20.7/11.5; 7.8–34.0/21.7), subalkaline granite (13.5–23.4/17.7; 0.1– 13.3/3.5), ion-adsorption (4.2–36.8/22.3; 4.5–34.2/16.3), alluvial (18.8–25.3/21.7; 1.6–11.9/5.4), and intrafault (4.6–10.5/7.6; 19.7–28.2/23.9). For some types of deposits, mineralogical or geological features that affect the increase in the proportion of deficient REE in ores have been established.

*Conclusions:* The obtained data quantitatively mark the boundaries of specialization of different types of REE deposits for the most popular REE groups. Such information enables specialists to more purposefully carry out regional forecasting and early-stage exploration for the identification of deposits with the desired ratio of different REE groups.

**Keywords:** rare earth elements, praseodymium, neodymium, heavy lanthanides, metallogenic types of deposits, specialization of deposits.

*Funding:* FMMR-2022-0013 project of the Russian government funded scientific program in SGM RAS.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

---

✉ Andrey V. Tkachev: [a.tkachev@sgm.ru](mailto:a.tkachev@sgm.ru)

For citation: Tkachev A. V., Vishnevskaya N. A., Chesalova E. I. Specialisation of rare earth deposits according to the elemental composition of their ores // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 2, pp. 57–72. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/2/57-72>

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

## REFERENCES

- 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.
- Bykhovskiy L. Z., Arkhangel'skaya V. V., Tiginov L. P., Anufrieva S. I. Perspektivy osvoeniya mineral'no-syr'evoi bazy i razvitiya proizvodstva skandiya v Rossii i drugih stranakh SNG [Prospects for the development of the mineral resource base and the development of scandium production in Russia and other CIS countries]. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie – Mineral Resources of Russia. Economics and Management*, 2007, no. 5, pp. 27–32. (In Russ.)
- 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 Geology Reviews*, 2021, vol. 128, 103906. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103906
- Audi G., Bersillon O., Blachot J., Wapstra A. H. The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties. *Nuclear Physics A*, 2003, vol. 729 (1), pp. 3–128. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2003.11.001
- Rudnick R. L., Gao S. Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry, vol. 3: Crust. Chap. 3.01*. Rudnick R.L., Holland H.D., Turekian K.K. – eds., Oxford: Elsevier and Pergamon, 2003, pp. 1–64. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4
- 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, vol. 200, 104475. DOI: 10.1016/j.jseaes.2020.104475
- Institute of Rare Earths and Strategic Metals site. URL: <https://ise-metal-quotes.com/> (assessed 25.01.2023)
- Chemcraft Ltd site. URL: [https://chemcraft.su/product/22955?field\\_packaging%5B0%5D=250](https://chemcraft.su/product/22955?field_packaging%5B0%5D=250) (assessed 25.01.2023).
- Adamas Intelligence. Rare earth elements: Market issues and outlook. Research report, 2019, 10 p. URL: <https://www.adamasintel.com/> (assessed 25.01.2023).
- Goodenough K.M., Wall F., Merriman D. The rare earth elements: Demand, global resources, and challenges for resourcing future generations. *Natural Resources Research*, 2018, vol. 27 (2), pp. 201–216. DOI: 10.1016/j.resourpol.2014.03.004
- 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. Vol. 52. P. 134–153. DOI: 10.1016/j.resourpol.2017.02.002
- Weng Z. H., Jowitz S. M., Mudd G. M., Haque N. A detailed assessment of global rare earth element resources: Opportunities and challenges. *Economic Geology*, 2015, vol. 110, pp. 1925–1952. DOI: 10.2113/econgeo.110.8.1925
- 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, vol. 41, pp. 52–59. DOI: 10.1016/j.resourpol.2014.03.004
- Wall F. Rare earth elements. G. Gunn – ed.: Critical metals handbook. London: Wiley, 2014, pp. 312–339. DOI: 10.1002/9781118755341.ch13
- Lapin A. V., Tolstov A.V., Ploshko V. V., Chemizova L. N., Sorokina T. I. Minerageniya kor vyvetrivaniya karbonatitov [Metallogeny of carbonatites' weathering crusts]. Moscow: GEOS, 2011. 308 p. (In Russ)
- Dostal J. Rare metal deposits associated with alkaline/peralkaline igneous rocks. *Reviews in Economic Geology*, vol. 18, 2016, pp. 33–54. DOI: 10.5382/Rev.18.02
- Linnen R. L., Samson I. M., Williams-Jones A. E., Chakhmouradian A. R. Geochemistry of the rare-earth element, Nb, Ta, Hf, and Zr deposits // H.D. Holland, K.K. Turekian – eds.: *Treatise on Geochemistry* (2nd Edition). Chapter 13.21. Amsterdam: Elsevier, 2014, pp. 543–568. DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.01124-4
- Sanematsu K., Watanabe Y. Characteristics and genesis of ion adsorption-type rare earth element deposits. *Reviews in Economic Geology*, vol. 18, 2016, pp. 55–80. DOI: 10.5382/Rev.18.03
- Sengupta D., Van Gosen B. S. Placer-type rare earth element deposits. *Reviews in Economic Geology*, vol. 18, 2016, pp. 81–100. DOI: 10.5382/Rev.18.04
- Verplanck P. L., Mariano A. N., Mariano A. Jr. Rare earth element ore geology of carbonatites. *Reviews in Economic Geology*, vol. 18, 2016, pp. 5–32. DOI: 10.5382/Rev.18.01
- Wang Z.-Y., Fan H.-R., Zhou L., Yang K.-F., She H.-D. Carbonatite-related REE deposits: an overview // *Minerals*, 2020, vol. 10. 965. DOI:10.3390/min10110965
- Balaran V. Rare earth elements: a review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact // *Geoscience Frontiers*, 2019, vol. 10 (4), pp. 1285–1303. DOI: 10.1016/j.gsf.2018.12.005
- 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 Geology Reviews*, 2020, vol. 122, 103521. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103521
- Simandl G. J. Geology and market-dependent significance of rare earth element resources. *Mineralium Deposita*, 2014, vol. 49, pp. 889–904. DOI: 10.1007/s00126-014-0546-z
- Voncken J. H. L. The rare earth elements: an introduction. *SpringerBriefs in earth sciences*. SpringerNature, 2016, 127 p. DOI: 10.1007/978-3-319-26809-5
- Zhou B., Li Z., Chen C. Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies. *Minerals*, 2017, vol. 7, 203. DOI: 10.3390/min7110203
- Serdyuk S. S., Lomaev V. G., Kuzmin V. I., Pashkov G. L., Shabanov V. F., Pavlov V. F., Mamonov S. N. Krasnoyarskii klaster – strategicheskii prioritet razvitiya redkometall'noi promyshlennosti Rossii [Krasnoyarskiy cluster – strategic development priorities of the rare metal industry in Russia]. *J. Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2015, vol. 8, iss. 7, pp. 816–834. DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-7-816-834
- Friedrichs P., Meyer F. M. REE database management system: Evaluation of REE deposits and occurrences. *J. Sustainable*

- Metallurgy*, 2017, vol. 3, pp. 13–31. DOI: 10.1007/s40831-016-0077-1
29. Tkachev A. V., Rundqvist D. V., Vishnevskaya N. A. Main features of the REE metallogeny through geological time. *Geology of Ore Deposits*, 2022, vol. 64 (3), pp. 41–77. DOI: 10.1134/S1075701522030060
30. 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, vol. 11, 4386. DOI: 10.1038/s41467-020-17801-5
31. Andersson S. S., Wagner T., Jonsson E., Fusswinkel T., Leijd M., Berg J. T. Origin of the high-temperature Olserum-Djupedal REE-phosphate mineralisation, SE Sweden: A unique contact metamorphic-hydrothermal system. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 101, pp. 740–764. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.08.018
32. Chelgani S. C., Rudolph M., Leistner T., Gutzmer J., Peuker U. A. A review of rare earth minerals flotation: Monazite and xenotime. *International J. Mining Science and Technology*, 2015, vol. 25, iss. 6, pp. 877–883. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.09.002
33. Jordens A., Cheng Y. P., Waters K. E. A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering*, 2013, vol. 41, pp. 97–114. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.10.017
34. Zhu Z., Pranolo Y., Cheng C. Y. Separation of uranium and thorium from rare earths for rare earth production—a review. *Minerals Engineering*, 2015, vol. 77, pp. 185–196. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.03.012
35. Singh Y. Rare earth element resources: Indian context. Springer Nature Switzerland, 2020, 395 p. DOI: 10.5382/econgeo.115.8.br01
36. Do Cabo V. N. Geological, mineralogical and geochemical characterisation of the heavy rare earth-rich carbonatites at Lofdal, Namibia. PhD thesis. UK, University of Exeter, 2013, 548 p. URL: <https://ore.exeter.ac.uk/repository/handle/10871/15034> (assessed 22.03.2023)
37. Nazari-Dehkordi T., Spandler C., Oliver N. H. S., Wilson R. Unconformity related rare earth element deposits: A regional-scale hydrothermal mineralization type of northern Australia. *Economic Geology*, 2018, vol. 113, pp. 1297–1305. DOI: 10.5382/econgeo.2018.4592
38. Möller V., Williams-Jones A. E. Stable and radiogenic isotope constraints on the magmatic and hydrothermal evolution of the Nechalacho Layered Suite, northwest Canada. *Chemical Geology*, 2016, vol. 440, pp. 248–274. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2016.07.010
39. 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, vol. 148, pp. 65–95. DOI: 10.1016/j.jseaes.2017.08.004
40. 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, vol. 1 (3), pp. 415–424. DOI: 10.31035/cg2018022
41. Slezak P., Spandler C., Border A., Whittock K. Geology and ore genesis of the carbonatite-associated Yangibana REE district, Gascoyne Province, Western Australia. *Mineralium Deposita*, 2021, vol. 56, pp. 1007–1026. DOI: 10.1007/s00126-020-01026-z

Ткачев Андрей Владимирович, д.г.-м.н., гл. н. с., Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Российская Федерация; e-mail: a.tkachev@sgm.ru; ORCID 0000-0001-9714-8404

Вишневецкая Наталья Анатольевна, н. с., Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Российская Федерация; e-mail: 200962@mail.ru; ORCID 0000-0003-1314-2545

Чесалова Елена Игоревна, н. с., Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Российская Федерация; e-mail: chesalova\_ei@mail.ru; ORCID 0000-0003-3479-7241

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Andrey V. Tkachev, Dr.habil. in Geology and Mineralogy, chief researcher, Vernadsky State Geological Museum, Moscow, Russian Federation; e-mail: a.tkachev@sgm.ru; ORCID 0000-0001-9714-8404

Natalia A. Vishnevskaya, researcher, Vernadsky State Geological Museum, Moscow, Russian Federation; e-mail: 200962@mail.ru; ORCID 0000-0003-1314-2545

Elena I. Chesalova, researcher, Vernadsky State Geological Museum, Moscow, Russian Federation; e-mail: chesalova\_ei@mail.ru; ORCID 0000-0003-3479-7241

Authors have read and approved the final manuscript.