

5. Принимая во внимание высокую урбанизацию районов добычи угля Кузбасса, необходимо, опираясь на уже накопленный опыт, распределение новых участков недр осуществлять с учетом положения населенных пунктов и допустимых экологических нагрузок на их территорию.

Влияние политики лицензирования на уровень добычи угля в условиях Кузбасса будет рассмотрено в отдельной публикации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2017 г.
2. Программа развития угольной промышленности России на период до 2030 г., утвержденная Распоряжением Правительства РФ от 21.06.2014 № 1099-р // Текст распоряжения опубликован на официальном интернет-портале правовой информации <http://www.pravo.gov.ru>, 27.06.2014.
3. Программа лицензирования угольных месторождений на период до 2020 г., утвержденная приказом Минприроды России от 06.12.2016 № 639 // www.rosnedra.gov.ru/article/9478.html.
4. Информационные ресурсы Роснедр (базы данных СИБД, СОБР Роснедра, АСЛН).
5. Отчеты недропользователей Кемеровской области по фактической добыче угля за 2016 и 2017 гг., а также о планируемых на основе календарных планов добычи по техническим проектам разработок участков недр объемах на период до 2028 г.

© Аксенов С.А., Гермаханов А.А., 2018

Аксенов Сергей Алексеевич // saksenov@rosnedra.gov.ru
Гермаханов Асламбек Асхатович // agermahanov@rosnedra.gov.ru

УДК 553.412:551.24.031

Ткачев А.В., Вишневецкая Н.А. (ГГМ РАН)

ГЕОИСТОРИЧЕСКИЕ ТЕНДЕНЦИИ В МЕТАЛЛОГЕНИИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассмотрено распределение ресурсов редкоземельных элементов (РЗЭ), аккумулированных в крупных и суперкрупных месторождениях (КСКМ) в течение геологической истории Земли. Установлено, что КСКМ РЗЭ преимущественно связаны с карбонатитовыми и щелочными магматическими комплексами. Возникшие в них рудные залежи нередко дополнительно обогащались в зоне гипергенеза. Небольшая часть ресурсов сосредоточена в самостоятельных гипергенных формациях. Каждый суперконтинентальный цикл выражен в металлогении РЗЭ особым образом: выявлены заметные межцикловые вариации в количестве КСКМ, их типовом разнообразии, сумме накопленных ресурсов и некоторых других характеристиках. **Ключевые слова:** металлогения, месторождения редкоземельных элементов, геологическая история, суперконтинентальный цикл.

Tkachev A.V., Vishnevskaya N.A. (SGM RAS)

GEOHISTORICAL TRENDS IN THE METALLOGENY OF RARE EARTH ELEMENTS

The authors consider a distribution of resources of rare earth elements (REE) accumulated in large to superlarge mineral deposits (LSMD) during the geological history of Earth. The

*LSMD are related predominantly to carbonatite and alkaline magmatic complexes. The ore bodies related to the complexes are often additionally enriched in supergene zones. A small part of the total resources are concentrated in the supergene formations independent of specific magmatic bodies. Every supercontinent cycle is expressed in a special way in the REE metallogeny: specific features revealed include meaningful variations between the cycles in the number of LSMD, their deposit type diversity, amount of accumulated resources, and some other features. **Keywords:** metallogeny, mineral deposits of rare earth elements, geological history, supercontinent cycle.*

Тема месторождений РЗЭ привлекла в XXI в. к себе особое внимание специалистов многих отраслей индустрии и науки. Это связано с заметной интенсификацией промышленного потребления этого вида минерального сырья и соответствующим всплеском интереса к нему и его природным источникам у горнодобывающих и геологоразведочных компаний, и как следствие — в сфере научных исследований. В геологических журналах появилось множество публикаций, описывающих как отдельные месторождения РЗЭ, так и крупные регионы распространения таких объектов. Глобальные обобщения пока единичны [9, 10, 14]. При этом вопрос эволюционных тенденций в исторической металлогении РЗЭ в публикациях практически не рассмотрен. Только в работе [12] эта тема затронута, но на небольшой выборке из 15 объектов, которую трудно считать представительной. Предлагаемый ниже анализ базируется на данных о 82 КСКМ со всех обитаемых континентов (рис. 1), что позволяет показать принципиально объективную картину распределения ресурсов РЗЭ на геохронологической оси и типы месторождений, которые эти ресурсы аккумулировали.

Вся первичная информация по объектам, вошедшим в исследование, собрана в базе данных КСКМ, имеющую общедоступную в Интернете ГИС-версию [4]. В выборку включены объекты, полная ресурсная оценка которых (прошлая добыча + запасы + прогнозные ресурсы) составляет не менее 0,1 млн т оксидов РЗЭ (РЗО). Проанализированы месторождения только лантаноидов и иттрия. Скандий, также входящий в общий перечень РЗЭ в ряде классификаций, не учитывался, так как его металлогения имеет некоторые особенности, требующие отдельного рассмотрения.

В выборке есть как гипогенные, так и гипергенные КСКМ. Для анализа они сгруппированы в шесть металлогенических типов (таблица). Большинство типов генетически связано с магматическими комплексами: карбонатитов, нефелиновых сиенитов, сиенитов и щелочных гранитов, субщелочных гранитов. При этом в их полную ресурсную оценку включались как собственно гипогенные залежи (ортомагматические, постмагматические гидротермальные и метасоматические), так и сформированные по ним коры выветривания (при их наличии).

Все известные на настоящий момент промышленно интересные месторождения в карбонатитовых комплексах, в гидротермальных жильных и метасоматиче-

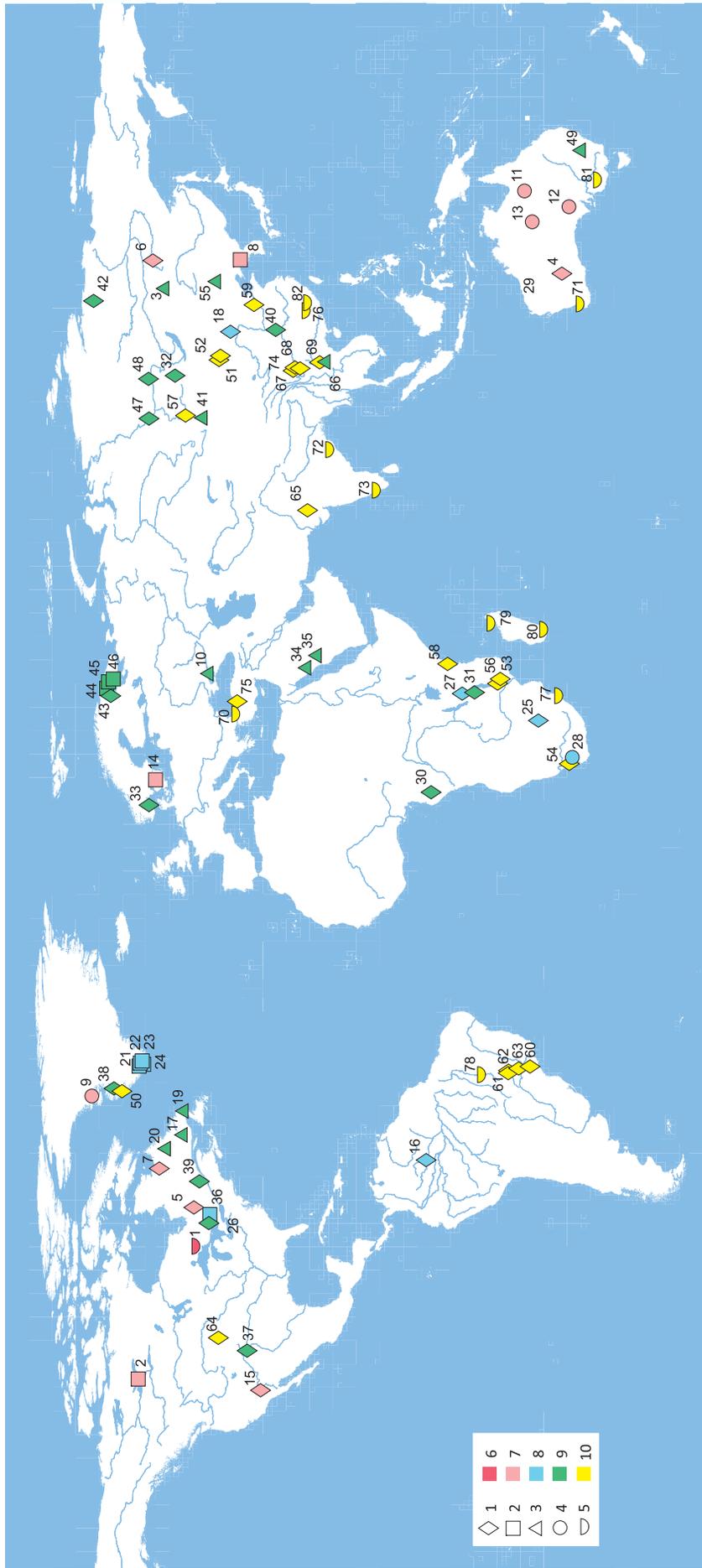


Рис. 1. Размещение КСКМ РЗЭ: 1 — карбонатитовый, 2 — нефелин-сиенитовый, 3 — сиенит-щелочногранитный, 4 — субщелочногранитный, 5 — россыпи и ионо-адсорбированные глины; 6–10 — принадлежность месторождений к суперконтинентальному циклу: 6 — кенорский, 7 — колумбийский, 8 — родинийский, 9 — пангейский, 10 — амазийский. КСКМ и специализация их руд: 1. Эллиот-Лейк (Zr-REE-Nb-Ta-Nb), 3. Катугинское (Zr-REE-Nb-Ta-Zr), 4. Маунт-Уэлд (REE-P-Nb-Ta-Zr), 5. Монтевиель (REE-Nb-P), 6. Селитгар (P-REE), 7. Ашрэм (REE-Nb-P), 8. Чонджу (REE), 9. Каррат (REE), 10. Азовское (REE-Zr), 11. Мери-Кэтлин (U-REE), 12. Олимпик-Дэв (Cu-Au-U-Fe-REE), 13. Ноланс-Бор (REE-P-U), 14. Норра-Черр (Zr-REE), 15. Маунтин-Пасс (REE-Va), 16. Сейс-Лагос (Nb-REE-Nb), 18. Байань-Обо (Fe-REE-Nb-F), 19. Фокстрот (REE-Zr), 20. Стрейндж-Лейк (Zr-REE-Ve-Nb), 21. Кванефельд (REE-Zn-U), 22. Сорсенен (REE-Zn-U), 23. Зона 3 (REE-Zn-U), 24. Танбрес (Zr-REE-Ta-Nb), 25. Гленовар (REE-P-Nb), 26. Кипава-Лейк (Zr-REE), 27. Нгуала (REE), 28. Стенкампскрал (REE), 29. Янгибана (REE-Fe), 30. Мабуни (P-REE-Nb-Ta-U), 31. Нкомбва-Хилл (REE-P), 32. Белозиминское (Nb-P-REE-Ta), 33. Фен (REE-Nb), 34. Джебель-Хамра (Zr-REE-Ta-Nb), 35. Джебель-Сайд (Zr-REE-Nb), 36. Лавернь (REE), 37. Паудерхорн (Ti-Fe-REE), 38. Сарфарток (REE), 39. Сент-Онора (REE-Nb-P-Ti), 40. Мьяя (REE-Nb), 41. Халзан-Буретгей (Zr-REE-Ta-Nb), 42. Томгор (Nb-REE-P-Sr), 43. Африканда (Ti-Fe-REE-Nb), 44. Хибины (P-REE-Ti), 45. Ловозерское (REE-Ta-Nb-Ti), 46. Ловозерское (Zr-REE), 47. Кийское (REE-P), 48. Чуктуконское (REE-P-Nb), 49. Тунджи (Zr-REE-Ta-Nb), 50. Какарсух (REE), 51. Хотгор (REE-P), 52. Мушгия-Худаг (REE-P), 53. Сонгве (REE), 54. Зандкопсдрифт (REE), 55. Баэрчжэ (Zr-REE-Ta-Nb-Ve), 56. Канганкунде (REE-Sr-P), 57. Карасуское (Fe-Va-F-REE-Sr-U-Mo), 58. Мрима-Хилл (REE-Nb), 59. Вэйшань (REE), 60. Араша Nb-P-REE-Va, 61. Каталан I (P-REE-Nb-Ti), 62. Каталан II (P-Nb-REE), 63. Покос-ди-Кальдас (REE-Zr-U-Mo), 64. Беар-Лодж (REE), 65. Камтай (REE-Sr), 66. Донгтао (REE-Va), 67. Мэноплин (REE-F-Va-Pb), 68. Мулочжай (REE-F), 69. Намсе (REE), 70. Чанакли (REE-Ti-Zr), 71. Кэйпел (Ti-Zr-REE), 72. Чатралур (Ti-Zr-REE), 73. Чавара (Ti-Zr-REE), 74. Далуцао (REE-F-Va-Sr), 75. Кызылджаорен (REE-F-Va), 76. Лоннань (REE), 77. Ричардс-Бэй (Ti-Zr-REE), 78. Серра-Верде (REE), 79. Танталус (REE), 80. Толаньяро (Ti-Zr-REE), 81. ВИМ-150 (Ti-Zr-REE), 82. Сюнью (REE).

ских телах ареалов субщелочных гранитов, а также залежи в россыпях всегда резко обогащены (85–98 % от суммы РЗО) легкими, или иначе цериевыми, РЗЭ (La, Ce, Pr, Nd, Sm). Для них наиболее типично доминирование монацита, реже — бастнезита, еще реже — ортита или других минералов (карбонатов, фосфатов, силикатов), богатых легкими лантаноидами. В нефелиновых сиенитах обычны руды на основе лопарита, ловозерита, бритолита, стенструпина или апатита, которые имеют похожую структуру распределения РЗО. Вместе с тем, в рудах из тех же комплексов с доминированием эвдиалита доля тяжелых или иттриевых РЗЭ (Y, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu), которые на рынке потребления более дефицитны, чем цериевые, может достигать трети от их общей суммы. Объекты с долей иттриевой группы от 30 % и выше, иногда даже больше 50 %, наиболее часто встречаются в сиенит-щелочногранитных комплексах и их вулканогенных аналогах. Чаще всего такую специализацию обеспечивают иттрофлюорит и/или силикаты (гиттинсит, гадолинит, джеренит и т.п.). Если рудоносны в таких комплексах только сиениты, то будут резко доминировать цериевые РЗЭ.

Месторождения ионно-адсорбированных (далее ионных) глин наследуют геохимическую специализацию магматических пород, которые размываются параллельно с формированием глин. Если при этом среды эродируемых пород, за счет размыва которых они формировались, есть эндогенные субстраты, обогащенные иттриевыми РЗЭ, то и среди адсорбированных РЗЭ иттриевая группа может иметь большую долю [16].

При создании использованной выборки гипогенных КСКМ был установлен нижний лимит среднего содержания в 0,35 % РЗО. Он отвечает минимальным значениям этого параметра в КСКМ, учтенных государственным балансом РФ [2]. Среди них есть разрабатываемые объекты с редкоземельными продуктами в списке извлекаемых веществ. Для россыпей и ионных глин лимит не устанавливался, так как в мире их эксплуатируют при более низких содержаниях РЗО.

В большинстве случаев РЗЭ входят в состав комплексных руд с P, Ta, Nb, Zr, Fe, U, F и некоторыми другими элементами (в разных сочетаниях), не всегда являясь их главным компонентом (рис. 1). Только ионные глины и часть карбонатитов имеют собственно редкоземельные залежи с крупными запасами. Промышленный интерес представляют как монокомпонентные, так и комплексные руды, но большая комплексность нередко создает дополнительные технологические сложности и соответственно повышает себестоимость переработки минерального сырья из-за необходимости разделения извлекаемых элементов. Поэтому вопрос экстракции того или иного компонента таких руд решается на основе экономических расчетов, в т.ч. и для РЗЭ. Например, в Cu-Au-U-Fe-REE гиганте Олимпик-Дэм редкоземельные, а также и железорудные минеральные фазы пока не извлекаются из руд даже в самых богатых частях залежи из-за низкой рентабельности.

Для сравнения металлогенических данных геологическое время было сегментировано авторами на эпохи, отвечающие суперконтинентальным циклам. Недавнее обобщение, выполненное для большой совокупности КСКМ всех генетических типов показало, что и интенсивность их формирования, и вариативность их типов демонстрируют очень четкую корреляцию с суперконтинентальной цикличностью [3]. Было установлено, что фаза активной сборки каждого из суперконтинентов прошлого, выделяющаяся высокими темпами прироста континентальной коры за счет ювенильных источников и максимальной интенсивностью регенерации зрелой континентальной коры в орогенных процессах, характеризуется наиболее интенсивным формированием месторождений, особенно, гипогенного ряда. Вблизи межцикловых рубежей, когда интенсивность эндогенных процессов относительно низкая, металлогеническая активность также проявлена слабее. Такая картина распределения КСКМ позволяет рекомендовать именно суперконтинентальные циклы в качестве базовых сегментов на оси геологического времени для глобальных металлогенических сравнений, особенно затрагивающих столь значительные периоды геологической истории, как в случае данного исследования.

Кенорский цикл (>2,25 млрд лет). Карбонатитовые и щелочные магматические формации являются материнскими для КСКМ, содержащие 98,8 % всех ресурсов РЗЭ в них (таблица). Все они известны в геологических комплексах пород с архея [7]. Однако пока только в одном из массивов того периода — интрузии нефелиновых сиенитов Сахарйок (2,61 млрд лет, Балтийский щит) — выявлены залежи с признаками промышленного месторождения [1]. По содержанию и количеству РЗО циркон-бритолиновые руды этого массива образуют объект с параметрами ниже установленных лимитов для КСКМ, который упомянут здесь только потому, что является древнейшей известной рудной залежью с рассматриваемой металлогенической специализацией.

На уровне КСКМ кенорский цикл представлен только литифицированными палеороссыпями (рис. 2). В глобальном масштабе их ресурсное значение очень мало (0,05 % от всей выборки), но с научной точки зрения они очень интересны. Единственный известный объект вмещает ураноносные конгломераты рудного поля Эллиот-Лейк (2,45 млрд лет, кратон Сьюперior). Раньше из них извлекали U и в небольших количествах концентрирующийся в ураноносных минеральных фазах Y. Новые технологии сделали возможным рентабельное извлечение РЗЭ из монацита и ряда других минералов, также присутствующих в руде [15].

В ураноносных конгломератах бассейна Витватерсранд (кратон Капваль), которые однотипны залежам на кратоне Сьюперior, но на 0,3–0,5 млрд лет древнее их, повышенные концентрации РЗЭ не отмечены [13]. Состав рудных минералов в россыпях Эллиот-Лейк указывает на принципиальную роль денудированных гранитов K-Na серии среди возможных источни-

Распределение ресурсов КСКМ редких земель по суперконтинентальным циклам и типам месторождений

Циклы ¹ (млрд лет)	Типы месторождений ^{2,3}																							
	Все типы			КБ				НС				СГЩ				ГС				РС+ИАГ				
	N	R	X	N	R	C	x	N	R	C	x	N	R	C	x	N	R	C	x	N	R	C	x	
Кенорский (>2,25)	1	0,3	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	1	0,3	0,2	100,0	
Колумбийский (1,35–2,25)	14	154,2	29,5	5	19,7	2,7	12,8	3	112,6	2,6	73,0	2	1,5	0,8	1,0	4	20,4	0,7	13,3	0	0,0	0,0	0,0	
Родинийский (0,75–1,35)	14	163,7	31,3	5	123,1	3,6	75,2	5	35,2	0,8	21,5	3	5,3	0,9	3,2	1	0,1	16,0	0,1	0	0,0	0,0	0,0	
Пангейский (0,19–0,75)	19	135,8	25,9	13	116,7	1,6	86,0	3	18,3	0,5	13,5	3	0,8	0,5	0,6	0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	
Амазийский (<0,19)	34	69,3	13,3	20	55,1	4,0	79,5	0	0,0	0,0	0,0	3	8,4	4,3	12,2	0	0,0	0,0	0,0	11	5,8	0,1	8,3	
Все циклы	82	523,3	100,0	43	314,6	2,9	60,1	11	166,1	2,0	31,7	11	16,0	2,7	3,1	5	20,6	0,8	3,9	12	6,0	0,1	1,2	

Примечание: 1 — геохронологические границы циклов по [3]; 2 — типы месторождений: КБ — в карбонатитовых комплексах, НС — в комплексах нефелиновых сиенитов, СГЩ — в сиенитовых, сиенит-щелочно-гранитных или щелочно-гранитных комплексах, а также их вулканических и субвулканических аналогах, ГС — постмагматические залежи в ассоциации с субщелочными гранитами, РС — россыпи, ИАГ — ионно-адсорбированные глины; 3 — характеристики для сравнения: N — количество КСКМ, R — суммарные ресурсы КСКМ (млн т РЗО), C — средневзвешенное содержание РЗО, X — доля (%) суммарных ресурсов цикла в общей сумме ресурсов, x — доля (%) суммарных ресурсов данного типа КСКМ в общей сумме их ресурсов соответствующего суперконтинентального цикла

ков, обеспечивших их формирование [15]. Это вполне согласуется с образованием этих палеороссыпей после возникновения насыщенных гранитными комплексами крупных орогенических поясов, «спаявших» суперконтинент Кенорленд в конце неогархея. Россыпи Витватерсранда возникли задолго до этого периода, и в их формировании, вероятно, определяющее значение имели другие источники сноса, не являющиеся крупными резервуарами минералов РЗЭ.

У палеороссыпей кенорского цикла нет полных аналогов в более поздних эпохах. Условия осадконакопления, изменившиеся в результате Великого Оксигенационного События (2,32–2,43 млрд лет), привели к отсутствию заметных скоплений минеральных фаз урана в россыпях, возникших после него [8]. Поэтому литифицированные россыпи других эпох для получения РЗЭ практического интереса не имеют, так как только извлечение дорогостоящего урана могло бы сделать их переработку выгодной.

Колумбийский цикл (1,35 — 2,25 млрд лет). Этот цикл намного более значим для металлогении РЗЭ, чем кенорский. Он представлен четырьмя типами КСКМ (табл. 1). Наиболее продуктивны нефелиновые сиениты: только в колумбийском цикле данный тип доминирует над другими типами. Ситуация почти полностью обусловлена наличием северокорейского месторождения Чонджу (1,87 млрд лет, Сино-Корейский щит), в котором главный концентратор РЗЭ — бритолизит. Причем в нашей выборке известная для объекта ресурсная оценка (216 млн т РЗО) уменьшена вдвое, т.к. она еще не подтверждена независимым контролем и пока не может считаться вполне достоверной.

В нефелиновых сиенитах также выявлены эвдиалитоносные залежи Нечалачо (2,18 млрд лет, кратон Слейв) и Норра-Черр (1,49 млрд лет, запад Балтийского щита).

Колумбийский цикл выделяется на фоне остальных заметной ролью КСКМ, связанных с субщелочным гранитным магматизмом (рис. 2). Древнейшим среди них является Каррат (1,86 млрд лет, Гренландский щит). Три других КСКМ локализованы в разных блоках основания Австралийской платформы: скарны

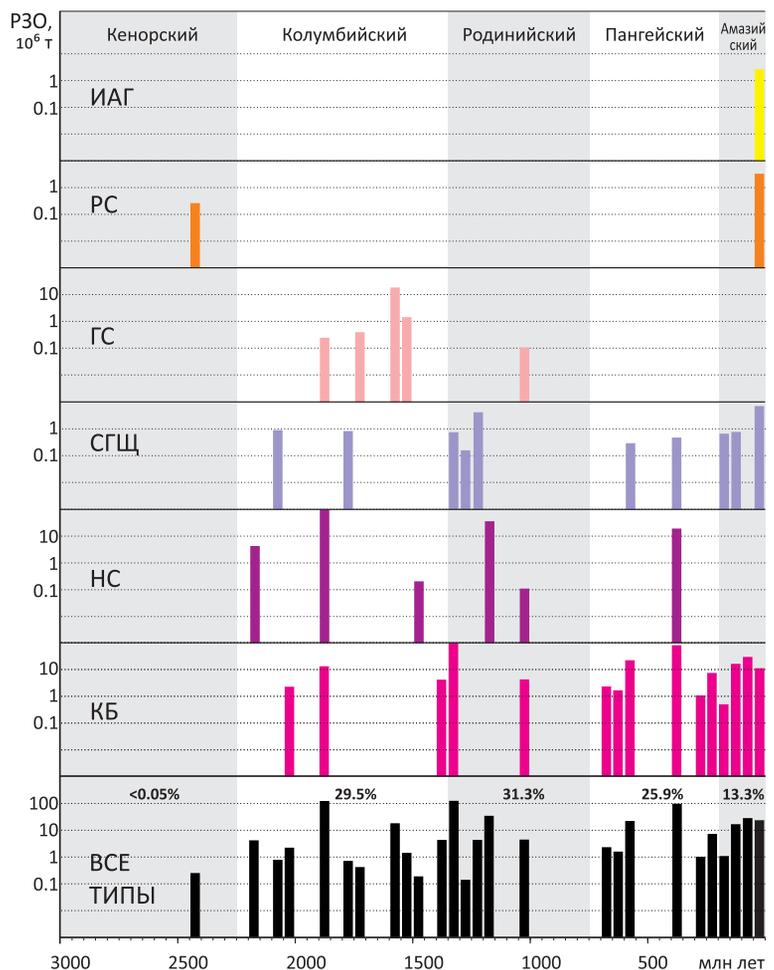


Рис. 2. Распределение ресурсов КСКМ различных типов на оси геологического времени с разделением на суперконтинентальные циклы. Шкала ресурсов — логарифмическая. Обозначения типов КСКМ см. в табл. 1.

(U-REE) Мэри-Кэтлин (1,74 млрд лет, Маунт-Айза), надинтрузивные брекчии (Cu-Au-U-Fe-REE) Олимпик-Дэм (1,59 млрд лет, Голер) и жильное поле (REE-P-U) Ноланс-Бор (1,53 млрд лет, Аранта). Редкоземельный потенциал ни одного из этих объектов пока промышленностью не используется.

Карбонатитовый тип по количеству ресурсов в цикле сопоставим с субщелочно-гранитным, но его реальное экономическое значение в настоящее время явно выше, так как Маунт-Уэлд (2,03 млрд лет, кратон Йилгарн) и Маунтин-Пасс (1,4 млрд лет, блок Мохаве) обрабатываются, а Монтвиель и Ашрэм-Эльдор (1,88 млрд лет, Канадский щит) активно разведываются. Только Селигдар (1,88 млрд лет, Алданский щит) с бедными апатитовыми рудами и примесью монацита в них оценен, но не намечен к освоению. Доля сиенит-щелочно-гранитного типа в ресурсах цикла минимальна (табл. 1) и сформирована двумя КСКМ: Катугинским (2,07 млрд лет, Алданский щит) с высокой долей Y в рудах, богатых иттрофлюоритом, и Азовским (1,8 млрд лет, Украинский щит), в котором иттриевых РЗЭ очень мало.

Из всех КСКМ колумбийского цикла только в Маунт-Уэлд основные ресурсы сосредоточены в коре выветривания. В остальных перечисленных объектах этого периода такие залежи не имеют большого значения или совсем отсутствуют.

Родинийский цикл (0,75 — 1,35 млрд лет). Сопоставим с колумбийским по доле в суммарных ресурсах РЗЭ. Они совпадают и по набору типов КСКМ, но соотношения их вкладов очень отличаются (табл. 1). В родинийском цикле доминирует карбонатитовый тип (>75 % ресурсов). Главный «виновник» данной ситуации — крупнейший в мире эксплуатируемый источник РЗЭ — Баянь-Обо (1,31 млрд лет, край Сино-Корейского щита). Больше половины цериевых РЗЭ в XXI в. было извлечено именно здесь. Ведется многолетняя дискуссия о возрасте и природе руд месторождения. В последних публикациях, на основе накопленных данных, доказан его мезопротерозойский возраст и карбонатитовая природа, а также наличие более поздних наложенных изменений руд, связанных с многократными деформациями, метаморфизмом и метасоматозом [16, 17]. Кроме лантаноидов из руд Баянь-Обо получают Fe и Nb, ведутся испытания по извлечению флюорита и Sc.

Близким по времени формирования с Баянь-Обо является Сейс-Лагос (1,33 млрд лет, кратон Амазонас) — ниобиевый гигант с попутными РЗЭ. Раньше по косвенным признакам предполагался юрский или неопротерозойский возраст этих карбонатитов, что недавно было опровергнуто прямыми определениями по цирконам [11]. Еще три КСКМ данного типа образовались вблизи рубежа 1,05 млрд лет: Янгибана (пояс Каприкорн), Нгуалла (пояс Убенди) и Гленовер (кратон Каапваль).

Много меньшую, но все же заметную роль среди КСКМ цикла играют залежи в нефелиновых сиенитах. Почти все они связаны со стратиформной минерали-

зацией агпаитового комплекса Илимауссак (1,16 млрд лет, Гренландский щит). В северной части интрузии (Кванефельд, Соренсен, Зона 3) разведаны лувявриты с U-РЗЭ-Zn рудами (стенструпин, ловозерит, сфалерит), а на юге (Танбрес) — с Zr-РЗЭ-Nb-Ta рудами (эвдиалит, пироклор). В рудах месторождения Кипава (1,03 млрд лет, Гренвильский пояс) главный минерал — эвдиалит в сочетании с мосандритом и бритолином.

Все три КСКМ сиенит-щелочно-гранитного типа родинийского цикла находятся на востоке Канадского щита и прилегающей части Гренвильского пояса. Месторождение Стрэндж-Лейк (1,24 млрд лет) выявлено в массиве щелочных гранитов. Наиболее богатые руды расположены в центральной пегматоидной части. Здесь половина суммы РЗО в подсчитанных ресурсах представлена тяжелыми РЗЭ. Прежде всего, это обусловлено ведущей ролью в рудах богатого иттрием гиттинсита. Два других КСКМ типа явно уступают и по ресурсам РЗО, и по доле в них иттриевой группы: Ту-Том (1,34 млрд лет) с REE-Be-Nb рудами залегает в сиенитах, а Фокстрот (1,3 млрд лет) с REE-Zr рудами — в комендит-пантеллеритовых вулканитах.

Монацит-кварцевожильное месторождение Стенкампскрал (1,05 млрд лет, пояс Намаква) — единственный объект цикла, связанный с субщелочными гранитами. Он выделяется самым высоким средним содержанием РЗО (16 %) среди всех КСКМ выборки.

Среди всех КСКМ гипогенного ряда, возникших в родинийском цикле, более поздние наложенные процессы в корях выветривания сформировали обогащенные руды в принципиально важных объемах только на двух: они в полной мере определяют известный ресурсный потенциал Сейс-Лагоса и очень значимы для Нгуаллы.

Пангейский цикл (0,19 — 0,75 млрд лет). Цикл немного уступает по сумме ресурсов и колумбийскому, и родинийскому. По распределению ресурсов между типами КСКМ он ближе к последнему: в нем также доминируют объекты, связанные с карбонатами (табл. 1). Самыми древними среди них являются Нкомбва-Хилл (0,67 млрд лет, пояс Убенди) и Мабуни (0,66 млрд лет, кратон Конго). В интервале 0,56–0,58 млрд лет образовались Сент-Онорэ и Лавернь (Гренвильский пояс), Сарфарток (Гренландский щит) и Фен (Свеко-Норвежский пояс). Паудерхорн (0,57 млрд лет, пояс Явапай) — редкий представитель данного типа с ведущей ролью перовскита среди минералов-концентраторов РЗЭ. Его единственный близкий аналог во всей выборке — Африканда (0,38 млрд лет, Балтийский щит).

Среди КСКМ цикла выделяется крупнейший в мире по занимаемой площади карбонатитовый комплекс Томтор (0,39 млрд лет, Сибирская платформа). Здесь разведан лишь фрагмент перемытой латеритной коры с богатейшими REE-Nb залежами, а остальной объем массива частично оценен по редкой сети скважин. Подсчитанные на этой основе ресурсы колоссальны [5]. Однако в данной оценке очень много экс-

траполяции. Поэтому для расчетов она снижена нами вдвое, но все равно составила 56,7 % от общих ресурсов цикла.

На Сибирской платформе и в ее западном обрамлении известны и другие КСКМ: Белозиминское (0,64 млрд лет), Кийское (0,26 млрд лет) и Чуктуконское (0,25 млрд лет). Кроме того, в раннемезозойском Циньлинском поясе сиенит-карбонатитовый массив Мяоя (0,43 млрд лет) с REE-Nb рудами локализован в экзотическом блоке древних пород.

Нефелин-сиенитовый тип представлен залежами двух гигантских апаитовых комплексов Кольской провинции — Хибинского и Ловозерского (0,37 млрд лет). Потенциал Хибин связан с добываемым здесь уже 90 лет апатитом. Однако лишь недавно из апатитового концентрата только одного рудника (Олений ручей) начали извлекать лантаноиды. В Ловозерском массиве два типа руд: P3Э-Ta-Nb — в лопаритовых луавритах и Zr-P3Э — в немного более поздних эвдиалитовых луавритах. Только первый тип эксплуатируется в небольших масштабах.

Залежи КСКМ сиенит-щелочногранитного типа в пангейском цикле немногочисленны: Джабаль-Саид, Джабаль-Хамра (0,59 млрд лет, Аравийский щит) и Халзан-Бурегтей (0,39 млрд лет, Центрально-Азиатский пояс). Все они имеют Zr-P3Э-Nb-Ta специализацию руд и повышенную, особенно в аравийских объектах, долю иттриевых P3Э.

Залежи коры выветривания имеют существенное значение в ресурсной оценке КСКМ пангейского цикла только в перечисленных выше объектах Сибирской платформы и ее обрамления, а также в Мабуни.

Амазийский цикл (<0,19 млрд лет). Этот цикл еще продолжается, находясь приблизительно на трети пути до завершения. Его доля в общей сумме ресурсов P3Э вдвое меньше, чем у пангейского. Карбонатитовый тип, как и в двух предшествовавших циклах, резко доминирует в суммарных ресурсах, а количество представляющих его КСКМ является максимальным среди всех циклов (табл. 1). Самое древнее КСКМ данного типа в цикле — Какарсук (0,16 млрд лет, Гренландский щит). Позже образовались рудоносные карбонатиты в Центрально-Азиатском поясе (Карасуг, Хотгор, Мушгия-Худаг, 0,12–0,14 млрд лет), поясе Намаква (Зандкопсдрифт, 0,13 млрд лет), Восточно-Африканской рифтовой зоне (Мрима-Хилл, Сонгве, Кангакунде, 0,11–0,13 млрд лет), Сино-Корейском щите (Вэйшань, 0,11 млрд лет), магматической провинции Алту-Паранаиба (Араша, Каталан I, Каталан II, Покос-де-Кальдас, 0,08–0,09 млрд лет), на западе Индийского щита (Камтай, 0,07 млрд лет), кратоне Вайоминг (Беар-Лодж, 0,05 млрд лет), Понтийском поясе (Кызылджаорен, 0,02 млрд лет) и активизированных зонах платформы Янцзы (Намсе, Маонюпин, Мулочжай, Далуцао, 0,01–0,03 млрд лет).

Сиенит-щелочно-гранитный тип представлен минерализованными интрузиями: трахитовыми порфирами Тунджи (0,18 млрд лет, бассейн Гуннеда) с Zr-REE-Nb-Ta рудами, щелочными гранитами Баэрчже

(0,12 млрд лет, Монголо-Охотский пояс) с Zr-REE-Nb-Ta-Be рудами и сиенитами Донг-Пао (0,03 млрд лет, край платформы Янцзы) с REE-баритовыми рудами. Более половины запасов P3Э в рудах Баэрчже представлено иттриевой группой.

В комплексах нефелиновых сиенитов и субщелочных гранитов цикла КСКМ P3Э пока не выявлены.

Среди гипогенных КСКМ амазийского цикла отмечается наибольшее число объектов с принципиальной ролью залежей коры выветривания в их ресурсной оценке — это все КСКМ в провинциях Алту-Паранаиба и Янцзы, а также месторождения Зандкопсдрифт и Карасуг.

Нелитифицированные молодые (редко древнее неогена) россыпи, обычно прибрежно-морского происхождения — важнейший промышленный источник Ti и Zr. Монацит тоже распространен в таких объектах, но он редко попутно извлекается, а потому его ресурсы не всегда оцениваются. Причина заключается в высоком содержании в нем тория, выделение и захоронение которого требуют особых затрат при переработке сырья, что снижает рентабельность. Тем не менее, этот тип месторождений — единственный внутренний источник производства P3Э в Индии (Чавара, Чатрапур). Подсчитаны также запасы P3Э в некоторых КСКМ данного типа Африки (Ричардс-Бэй, Таланьяро), Австралии (ВИМ-150, Кейпел).

Пролувиально-делювиальное россыпное поле Чанакли (Турция) — единственный представитель данного вида россыпей среди КСКМ. Оно выявлено в ареале позднекайнозойского щелочного вулканизма [6]. Основные концентраты P3Э здесь — чевкинит, ортит и сфен.

Ионные глины — важный источник иттриевых (но не только) P3Э в Китае, где объекты этого типа были впервые выявлены и начали эксплуатироваться [16]. Они редко содержат крупные запасы. Поэтому из китайских объектов в анализируемую выборку попали только крупнейшие из них — Лоннань и Сюнью (провинция Цзянси). В последние годы их аналоги начали выявлять и в других странах тропического пояса: Бразилии (Серра-Верде) и Мадагаскаре (Танталус). Доля иттриевой группы P3Э в них также повышена. Суммарные ресурсы P3Э, сосредоточенные в этих КСКМ, составляют почти половину от всех ресурсов гипергенных объектов амазийского цикла, которые попали в нашу выборку (таблица).

Таким образом, представленный глобальный обзор показал, что вклад разных типов месторождений P3Э в выявленных к настоящему времени суммарных ресурсах КСКМ заметно варьирует от одного суперконтинентального цикла к другому. Научное объяснение причин такого положения вещей требует дополнительных исследований. Однако выявленные эмпирические тенденции уже сейчас можно использовать при региональном металлогеническом прогнозировании.

В частности, крайне маловероятно выявление промышленно привлекательных аккумуляций P3Э в геологических формациях, возникших до рубежа 2,2 млрд лет.

Проявления содержащих РЗЭ руд столь древнего возраста, в лучшем случае, могут представлять только попутный интерес, если в них есть в достаточных концентрациях еще какой-то компонент с высокой рыночной стоимостью, например, уран и/или золото.

Крупные рудные залежи, генетически связанные с субщелочными гранитами, с наибольшей вероятностью можно ожидать в палео- и мезопротерозойских комплексах. Однако встречаются они очень редко.

Нефелиновые сиениты с рудами РЗЭ встречаются чаще и иногда формируют гигантские по ресурсам РЗЭ залежи. Вместе с тем, в интрузивных комплексах такого состава крупные месторождения известны только в колумбийском, родинийском и пангейском циклах.

Сиениты и щелочные граниты с КСКМ РЗЭ не известны только в кенорском цикле. В каждом из остальных циклов выявлено по 2–3 крупных объекта данного типа. Среди них есть КСКМ с высоким выходом иттриевых РЗЭ, но за исключением активно разрабатываемого Баэрчжэ, другие его аналоги находятся в экономически слабо освоенных районах.

Карбонатиты представляют наиболее распространенный тип месторождений РЗЭ — их доля в проанализированной выборке КСКМ превышает половину как в количестве объектов, так и в сумме оцененных ресурсов. Этот тип — главный природный источник РЗЭ для современной промышленности в мире. Его представители известны во всех циклах, кроме кенорского, причем частота их формирования, если следовать собранным данным (таблица, рис. 2), постоянно увеличивалась от родинийского цикла к амазийскому. Выявление новых объектов подобного типа в дополнение к уже известным на территории РФ вполне реально.

Нахождение месторождений ионных глин на российской территории маловероятно из-за отсутствия соответствующих молодых формаций, сформированных в тропическом влажном климате. Поиск новых и переоценка уже известных монацит-содержащих россыпей реальна только в случае начала активного развития ториевой энергетики — тогда торий можно было бы коммерчески использовать, а не тратить средства на его долгосрочное захоронение.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта № 0140–2018–0003 государственной работы в ФГБУН «Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского» РАН (ГГМ РАН).

ЛИТЕРАТУРА

1. Зозуля, Д.Р. Бритолитовые руды Zr-Y-REE месторождения Сахарйок (Кольский п-ов): геохимия, минералогия и стадийность образования / Д.Р. Зозуля, Л.М. Лялина, Е.Э. Савченко // Геохимия. — 2015. — № 10. — С. 913–924.
2. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2015 году. Гос. доклад (гл. ред. Е.А. Киселев). — М.: Минприроды Российской Федерации. — 2016. — 341 с.
3. Ткачев, А.В. Глобальные тенденции в эволюции металлогенических процессов как отражение суперконтинентальной цикличности / А.В. Ткачев, Д.В. Рундквист // Геология рудных месторождений. — 2016. — № 4. — С. 295–318.
4. Ткачев, А.В. Веб-ГИС «Крупнейшие месторождения мира» / А.В. Ткачев, Д.В. Рундквист и др. // Геоинформатика. — 2015. — № 1. — С. 47–59.

5. Фролов, А.А. Карбонатитовые месторождения России / А.А. Фролов, А.В. Толстов, С.В. Белов. — М.: НИИ-Природа, 2003. — 494 с.
6. Deady, E. Rare earth element placer deposits and alkaline volcanics: a case study from Aksu Dianas, Çanakli, Turkey / E. Deady, K. Goodenough, A. Lacinska, et al. // Applied Earth Science. — 2016. — V. 125(2). — P. 79–80.
7. Downes, H. Continuing the carbonatite controversy / H. Downes, F. Wall, A. Demény, C. Szabó // Mineralogical Magazine. — 2012. — V. 76. — P. 255–257.
8. Holland, H.D. The oxygenation of the atmosphere and oceans / H.D. Holland // Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. — 2006. — V. 361. — P. 903–915.
9. Kanazawa, Y. Rare earth minerals and resources in the world / Y. Kanazawa, M. Kamitani // J. Alloys and Compounds. — 2006. — V. 408–412. — P. 1339–1343.
10. Orris, G.J. Rare earth element mines, deposits, and occurrences / G.J. Orris, R.I. Grauch. U.S. Geological Survey Open-File Report 02–189. U.S. Geological Survey, Tucson. — 2002. — 174 p.
11. Rossoni, M.B. U-Pb zircon geochronological investigation on the Morro dos Seis Lagos Carbonatite Complex and associated Nb deposit (Amazonas, Brazil) / M.B. Rossoni, Bastos Neto A.C., V.S. Souza et al. // J. South American Earth Sciences. — 2017. — V. 80. — P. 1–17.
12. Smith, M.P. From mantle to critical zone: a review of large and giant sized deposits of the rare earth elements / M.P. Smith, K. Moore, D. Kavcicsánszki, et al. // Geoscience Frontiers. — 2016. — P. 315–334.
13. The mineral resources of South Africa. Handbook. Wilson M.G.C., Anhaeusser C.R. (eds). Pretoria: Council for Geoscience. — 1998. — 740 p.
14. Weng, Z. A detailed assessment of global rare earth element resources: opportunities and challenges / Z. Weng, S.M. Jowitt, G.M. Mudd, N. Haque // Economic Geology. — 2015. — V. 110. — P. 1925–1952.
15. Workman, A. Update report on the Appia Energy Corp. uranium-rare earth property, Elliot Lake district, North-Central Ontario, Canada. Toronto: Watts, Griffis and McQuat Ltd / K. Breede, J. Goode. — 2013. — 203 p. (www.sedar.com — 15.12.2017).
16. Xie, Y. Rare earth element deposits in China / Y. Xie, Z. Hou, R.J. Goldfarb, et al. // Reviews in Economic Geology. — 2016. — V. 18. — P. 115–136.
17. Zhang, S.-H. 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 / S.-H. Zhang, Y. Zhao, Y. Liu // Precambrian Research, 2017. — doi: 10.1016/j.precamres.2017.01.024.

© Ткачев А.В., Вишневецкая Н.А., 2018

Ткачев Андрей Владимирович // a.tkachev@sgm.ru
Вишневецкая Наталья Анатольевна // 200962@mail.ru

УДК 553.411(571.61)

Степанов В.А. (НИГЦ ДВО РАН), Мельников А.В. (ИГИП ДВО РАН)

ПЕРСПЕКТИВЫ ЗОЛОТОНОСНОСТИ РУДНО-РОС- СЫПНЫХ УЗЛОВ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ПРИАМУР- СКОЙ ПРОВИНЦИИ

В северной части Приамурской золотоносной провинции выделены Северо-Становая с Южной и Северной подзонами и Южно-Якутская металлогенические зоны. В них расположены 33 рудно-россыпных узла, отличающихся по геологическому строению, особенностям золотого оруденения и продуктивности россыпей. По уровню золотодобычи три узла отнесены к средне продуктивным (Сугдзарский, Кабактанский и Верхнетимптонский), остальные — к низко продуктивным. В пределах северной части провинции добыто 97,2 т россыпного и около 0,5 т рудного золота, что свидетельствует о недостаточной изученности территории на рудное золото. Семь рудно-