



ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. А. П. КАРПИНСКОГО

Перспективы выявления месторождений РЗМ ионно-адсорбционного типа на территории Южного Урала

Леонтьев Василий Иванович

Краденов Павел Константинович

Сурин Тимофей Николаевич

Структура минерально-сырьевой базы REE Мира

Минеральные ресурсы РЗМ и их товарная добыча в мире

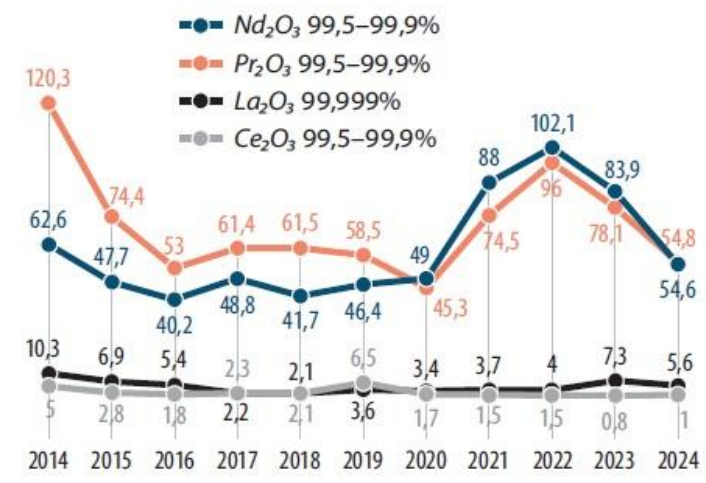
Страна	Минеральные ресурсы*, категория	Минеральные ресурсы, млн т ΣTR ₂ O ₃	Доля в мировых минеральных ресурсах, % (место в мире)	Товарная добыча в 2023 г., тыс. т ΣTR ₂ O ₃	Доля в мировой добыче, % (место в мире)
Китай	Mineral Resources	164 ¹	43,3 (1)	255 ^{2**}	70,8 (1)
США	Mineral Resources	14 ¹	3,7 (7)	43 ²	11,9 (2)
Мьянма	Mineral Resources	н/д	–	38 ²	10,6 (3)
Австралия	Measured+Indicated+Inferred Resources	28,8 ³	7,6 (3)	16,8 ²	4,7 (4)
Индия	Reserves***	6,9 ²	1,8 (9)	2,9 ²	0,8 (5)
Россия	Балансовые запасы кат. А+В+С ₁ +С ₂	28,5 ⁴	7,5 (4)	2,6 ⁴	0,7 (6)
...
Вьетнам	Mineral Resources	71,2 ⁵	18,8 (2)	0,6	
Прочие	Mineral Resources	65 ⁶	17,2	1,1	
Мир	Минеральные ресурсы	378,4	100	36	

Группа тяжёлых REE является дефицитной. Главным источником REE тяжелой группы в настоящее время являются глины с ионно - адсорбированными REE, добываемые в Китае и Мьянме.

Южный Урал обладает высокими перспективами выявления подобных объектов.

Однозначным лидером по производству REE и их поставкам на мировой рынок является Китай. На его территории расположено уникальное (содержит 70% запасов REE Китая) полигенное месторождение бастнезит-эгириновых карбонатитов Баян-Обо.

В стране также разрабатываются месторождения в ионно-абсорбционных глинах, в которых заключено 80% (или 1,5 млн т) мировых запасов среднетяжелых лантаноидов и иттрия.

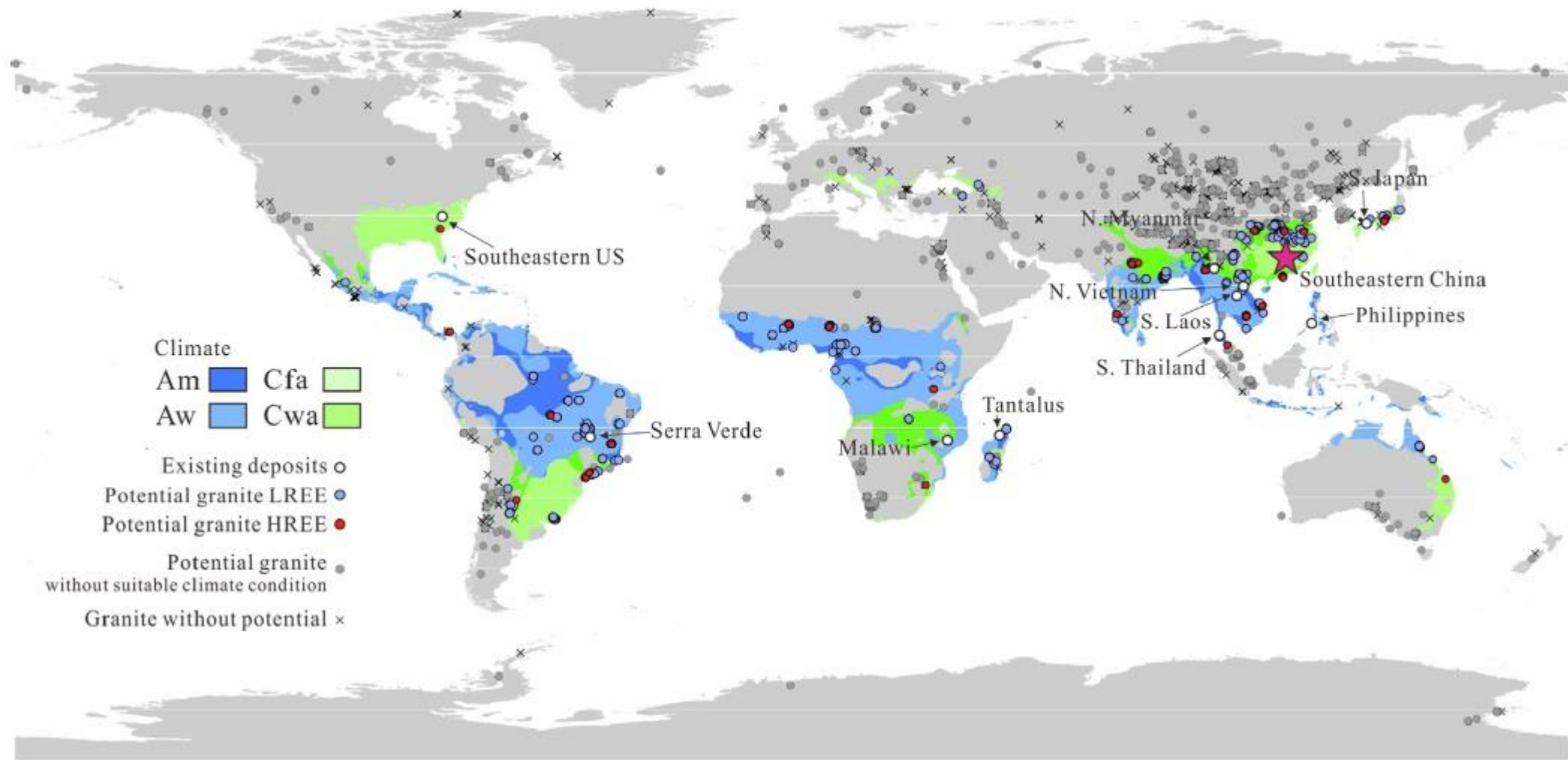


Динамика цен на РЗМ легкой группы (FOB Китай) в 2014–2024 гг., долл./кг



Динамика цен на РЗМ тяжелой группы (FOB Китай) в 2014–2024 гг., долл./кг

Ионно-адсорбционный тип месторождений редкоземельных металлов – распределение в Море



Ионно-адсорбционный тип месторождений редкоземельных металлов



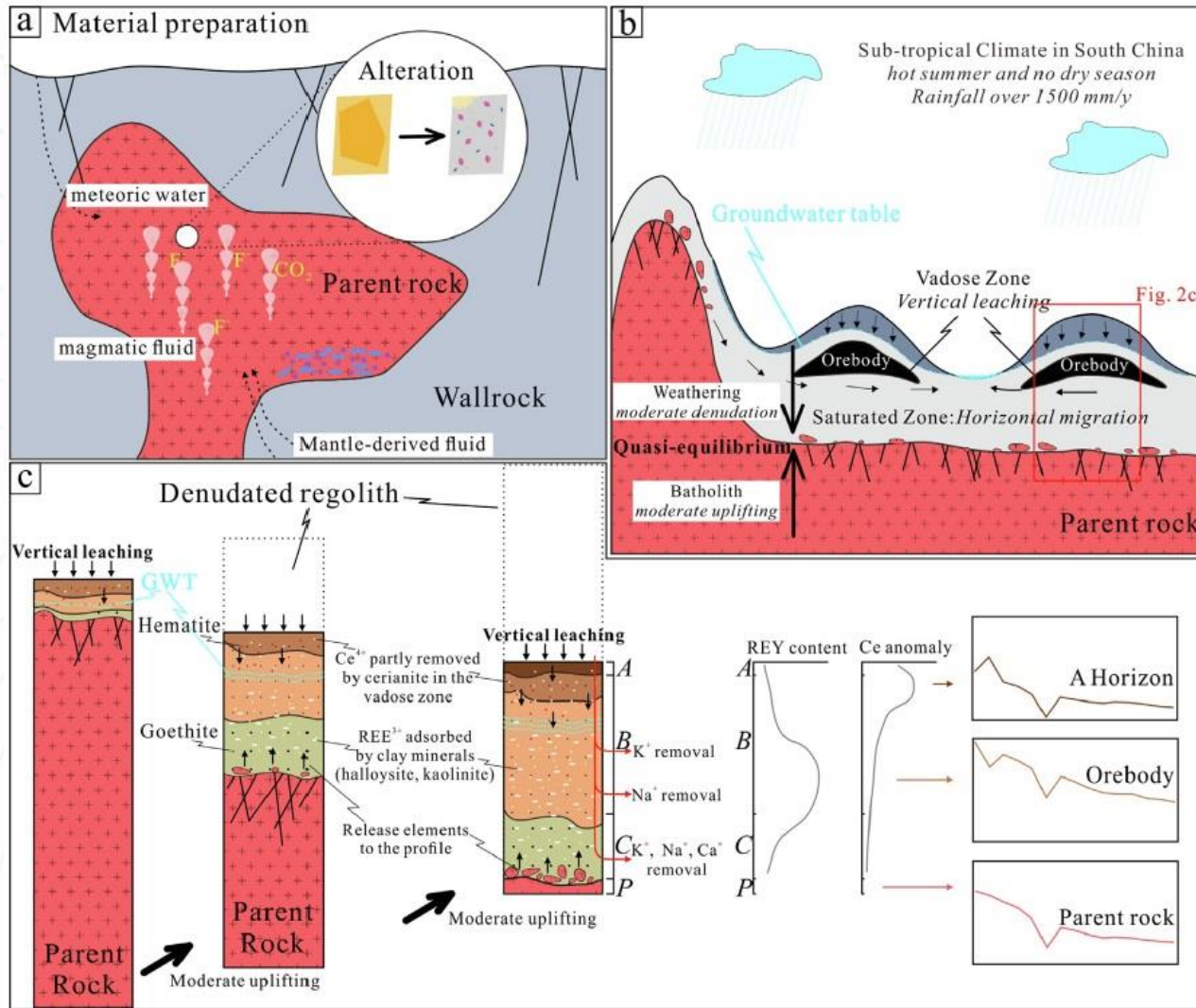
Ионно-адсорбционные руды не требуют дробления, измельчения и других видов обогащения, а REE легко извлекаются путём ионного обмена с использованием разбавленного электролита (к примеру раствора сульфата аммония) при комнатной температуре. Такой металлургический процесс позволяет экономически эффективно разрабатывать руды с низкими содержаниями. В отличие от других типов месторождений REE, руды обычно имеют низкие содержания U и Th.

Добыча REE на месторождении ионно-адсорбционного типа в Южном Цзянси методом кучного выщелачивания (Wang et al. / *China Geology* 3 (2018) 415–424)

Характеристика главных ионно-абсорбционных REE месторождений Южного Китая (Sanematsu and Watanabe, 2016)

Провинция или регион	Запасы (оксиды REY)	Ресурсы	Месторождение	Содержание REY, ppm	Извлечение, %	Мощность рудных залежей, м
Цзянси	9,4 млн.т.	неизвестно	Longnan	143–1 228 (Zudong); 336–886 (Guanxi)	47-100	~10 (до 30)
			Heling	1 020–1 530 (до 6 460) в аппогранитных рудах, 510 – 1 510 (до 4 900) в аппоритовых	>60	6–9 (до 28)
			Dingnan	287–651	>42	~10
			Dajishan	311–990	неизвестно	до 30
			Datian	неизвестно	>60	Неизвестно
			Yangbu	неизвестно	неизвестно	~7
Гуандун	неизвестно	0,52 млн.т. (?)	Wujingfu и Wufang	~800	>60	Неизвестно
			Laishi	~800	80–90	до 30
			Zhaibeiding	~800	>70	Неизвестно
			Renju	680–1 800 (до 4 100)	>65	Неизвестно
			Xiache	850–1 250 (до 2 800)	72.6–85.5	Неизвестно
Гуанси-Чжуан	1,1 млн.т.	неизвестно	Huashan	429–679	неизвестно	Неизвестно
			Guposhan	699–1 324	неизвестно	Неизвестно
			Qinghu	640–1 700	57.7	8.3–22.6 (ср. 15,1)
			Majigang	590–2 260	74.0	20-30 (ср.22)
Фуцзянь	4 млн.т.	неизвестно	Chengnan	420–1 700	41–72	0.72–7.45 (до 17,3)
			Xiaota	510–1 700	неизвестно	8–20 (до 30)
Хунань	неизвестно	0,02 млн.т.	Guposhan	до 1 327	неизвестно	Неизвестно
Юнань	неизвестно	неизвестно	Long'an	~1 100 (до 2 900)	30–40	4–13 (ср. 6,6)

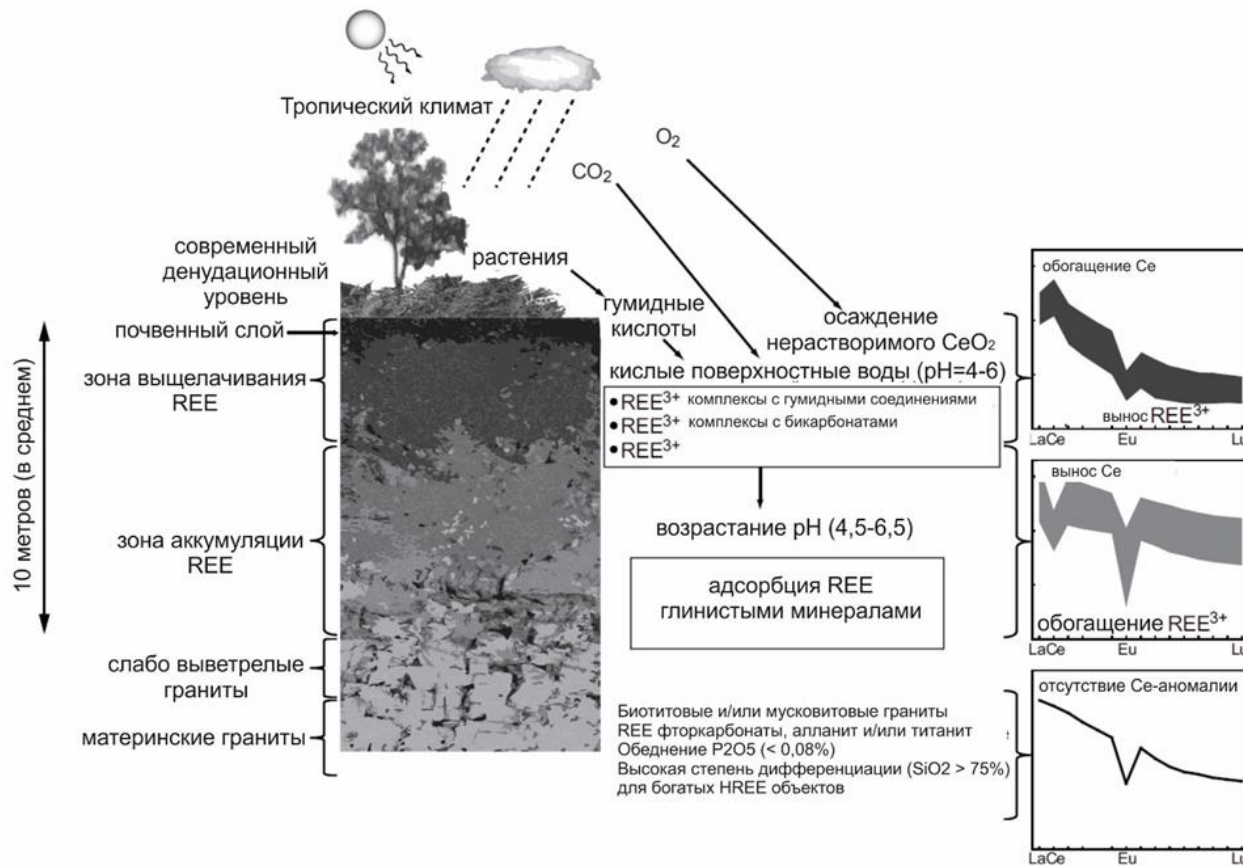
Геолого-генетическая модель REE оруденения ионно-адсорбционного типа



Граниты, выветривание которых привело к формированию месторождений, являются продуктами субдукционного или внутриплитного магматизма. Эти исходные гранитоиды представляют собой **биотитовые и/или мусковит содержащие граниты** и характеризуются содержанием $\text{SiO}_2 > 70\%$, $\text{P}_2\text{O}_5 < 0,08\%$ и составом от металюминиевых до слабопералюминиевых ($\text{ASI} < 1,1$). Высокодифференцированные ($\text{SiO}_2 \sim 75\%$) мусковитовые граниты значительно обогащены REE по сравнению с биотитовыми гранитами и, в частности, характеризуются наличием флюорита и гидротермальных минералов, содержащих REE, в частности **фторокарбонатов REE**, которые образовались в результате гидротермальных изменений. Магматический **алланит** и **титанит** либо изменяются с образованием гидротермальных минералов, содержащих REE, либо почти полностью разрушаются во время выветривания.

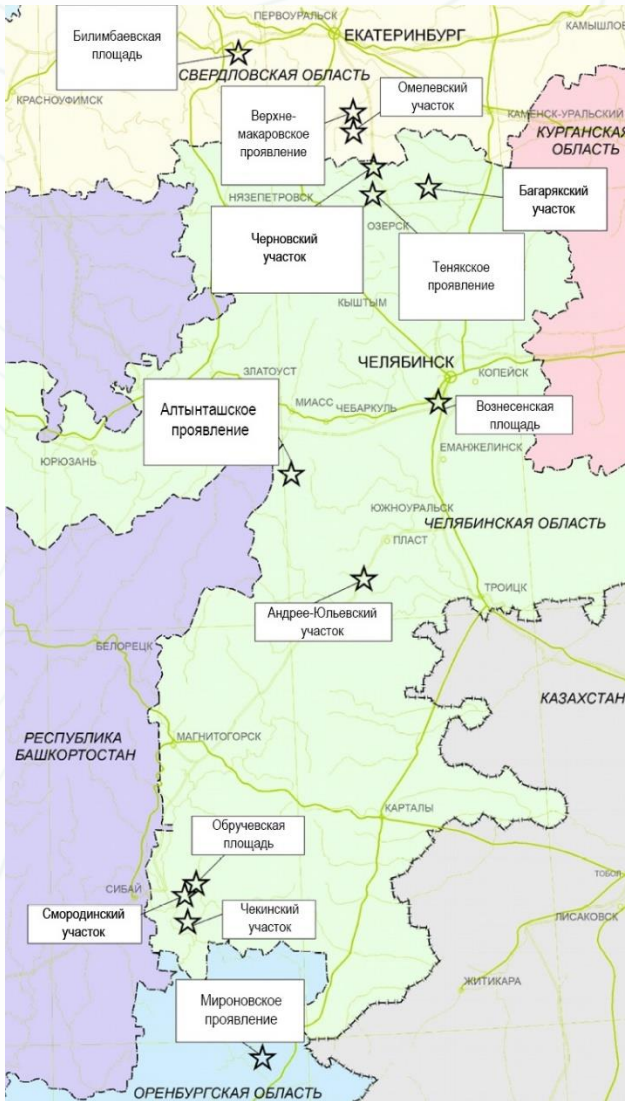
Выветриваемые минералы, содержащие REE, включая **фторкарбонаты, алланит и титанит**, являются исходными минералами для ионно-адсорбционных руд. Присутствие легко выветриваемых минералов HREE в гранитах, по-видимому, является основным фактором, определяющим наличие залежей богатых HREE руд, хотя химический состав поверхностных вод и выветриваемых пород также может влиять на фракционирование REE в ходе корообразования. Монацит, циркон и ксенотим также присутствуют в гранитах, но поскольку они более устойчивы к химическому выветриванию, они, как правило, не являются источником REE.

Геолого-генетическая модель REE оруденения ионно-адсорбционного типа



Минералы, содержащие REE, разлагаются кислыми поверхностными водами на верхних уровнях профиля выветривания, и ионы REE^{3+} перемещаются вниз по профилю. REE переносятся в комплексе с гуминовыми веществами, карбонатными и бикарбонатными ионами или в виде ионов REE^{3+} при почти нейтральном pH от 5 до 9. Ионы REE^{3+} осаждаются из раствора путем адсорбции на вторичных минералах или встраиваются в них. Удаление из водной фазы происходит из-за повышения pH, которое является результатом либо взаимодействия воды с породой, либо смешивания с грунтовыми водами с более высоким pH. REE обычно адсорбируются на поверхностях **каолинита и галлуазита**. Кроме того, некоторые REE иммобилизованы во вторичных минералах, состоящих в основном из фосфатов, содержащих REE (например, **рабдофан и флоренцит**). В отличие от других REE, которые перемещаются вниз по профилю выветривания, Ce менее подвижен и включается в оксиды Mn и церианит (CeO_2) в качестве Ce^{4+} в приповерхностных окислительных условиях. В результате профиль выветривания месторождений может быть разделен на зону выщелачивания REE в верхней части профиля с положительной аномалией Ce и зону накопления REE с ионно-адсорбционными рудами в нижней части профиля, которая характеризуется отрицательной аномалией Ce.

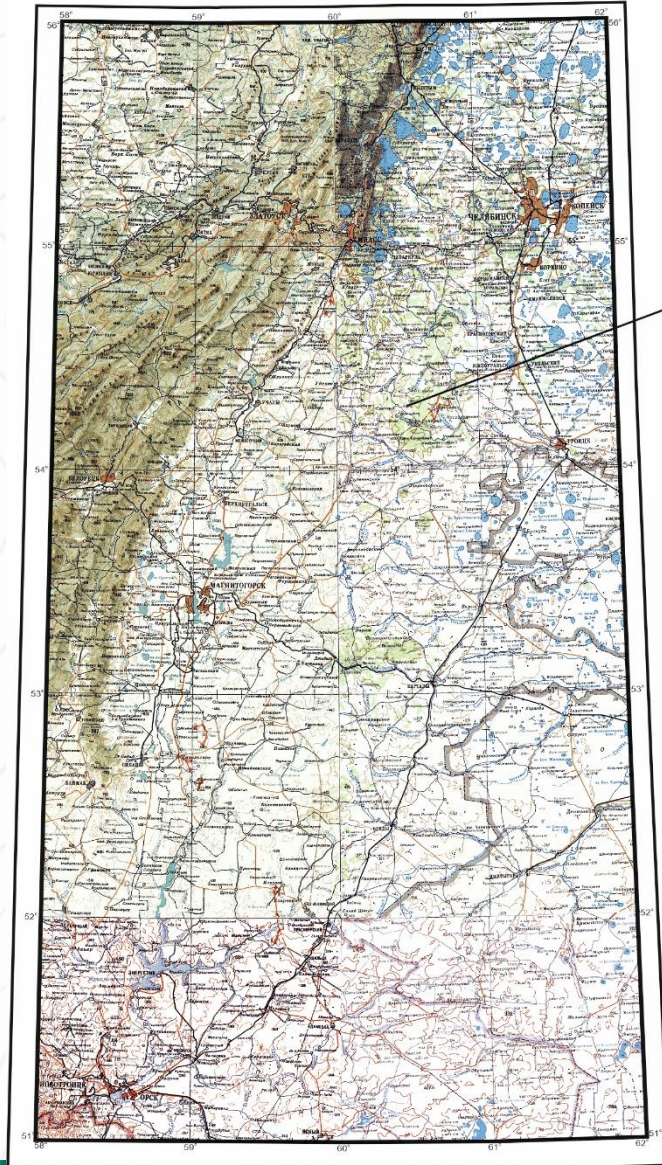
Обзор результатов предшествующих работ на территории Среднего и Южного Урала



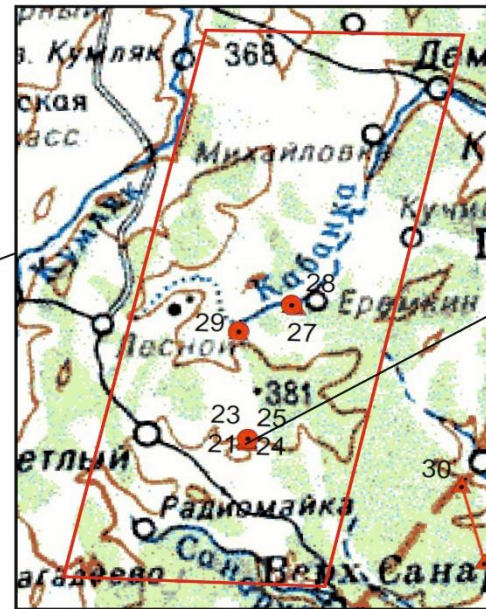
Территория Южного и Среднего Урала характеризуется широким развитием остаточных каолиновых кор выветривания мезозойского возраста, что в купе с присутствием породных комплексов – потенциальных источников ионов REE, определяет широкие перспективы выявления промышленных месторождений редкоземельных металлов средне-тяжёлой группы ионно-адсорбционного типа. Присутствие подобной минерализации подтверждено поисковыми и тематическими работами, проведенными в конце прошлого века. В ходе работ на территории Урала выявлено более 10 перспективных участков с общими прогнозными ресурсами REE и Y, превышающими 500 тыс. тонн.

Результаты полевых работ:

Карта фактического материала



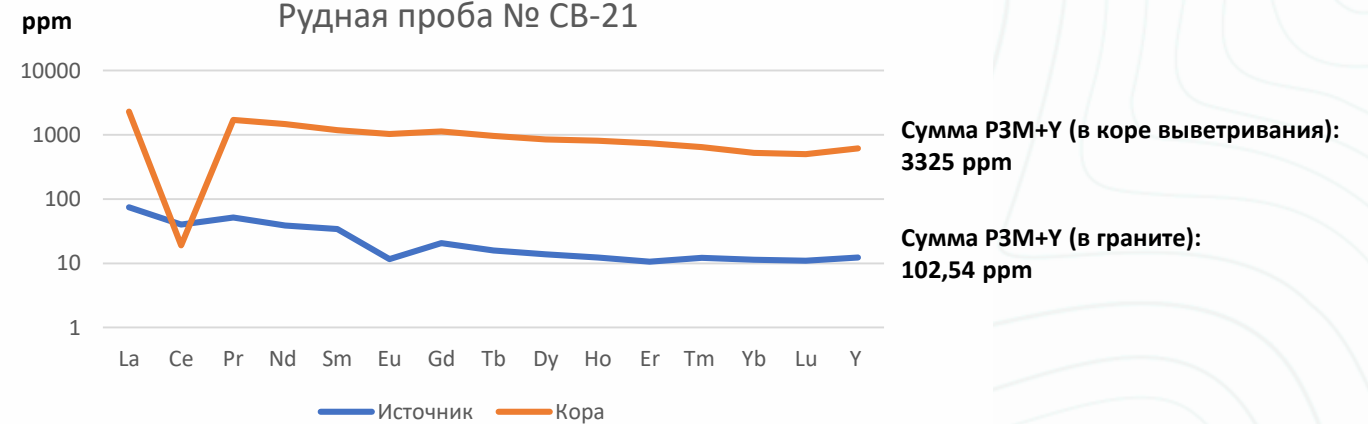
Светлинская площадь

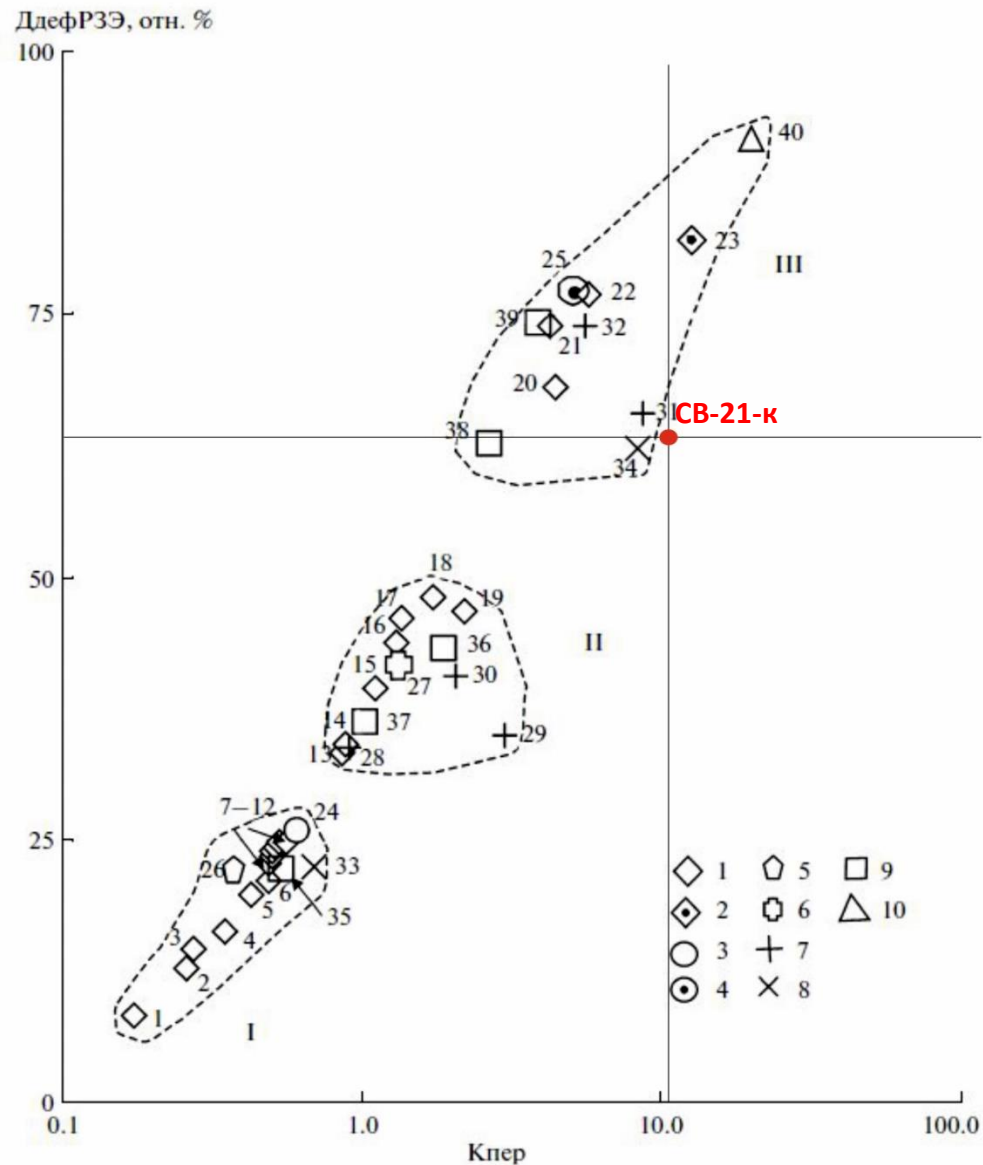


Стенка Светлинского карьера с местом отбора пробы богатой РЗЭ



Рудная проба № СВ-21





Дефицитные и потенциально дефицитные – Nd, Tb, Dy, Y, Eu, Er;
Недефицитные – La, Pr, Sm, Gd;
Избыточные – Ce, Ho, Tm, Yb, Lu.

$$Кпер = (Nd + Eu + Tb + Dy + Er + Y / \Sigma REE) / (Ce + Ho + Tm + Yb + Lu / \Sigma REE).$$

$$Кпер = ((671 + 58,2 + 34,7 + 209 + 118 + 968) / 3325) / ((11,6 + 44,2 + 15,8 + 84,2 + 12,3) / 3325) = 12,25$$

$$ДдефРЗЭ, отн. \% = Nd + Eu + Tb + Dy + Er + Y / \Sigma REE$$

$$ДдефРЗЭ, отн. \% = (671 + 58,2 + 34,7 + 209 + 118 + 968) / 3325 = 0,62$$

Рисунок... Классификация рудных объектов по перспективности индивидуального состава РЗЭ.

1 – гидротермальные и магматогенные руды карбонатных, щелочных и щелочногранитных комплексов (1 – Баян Обо, Китай; 2 – Маунтин Пасс, США; 3 – Ловозеро, Россия – лопаритовые руды; 4 – Биа Лодж, США; 5 – Маунт Уелд, Австралия; 6 – Кукисвумчорр, Россия; 7 – Стинкампскрааль, ЮАР; 8 – Хойдас Лэйк, Канада; 9 – Ноланс, Австралия; 10 – Тор Лэйк, Канада – верхняя рудная зона; 11 – Маонюпинь, Китай; 12 – Томтор, Россия; 13 – Дуббо, Австралия; 14 – Тор Лэйк, Канада – нижняя рудная зона; 15 – Бенджамин Ривер, Канада; 16 – Ловозеро, Россия – эвдиалитовые руды; 17 – Вердженог, ЮАР – апатитмагнетитовые руды; 18 – Кутессай II, Киргизия; 19 – Лемхи Пасс, США; 20 – Кичерское, Россия; 21 – Брокман, Австралия; 22 – Вердженог, ЮАР – флюоритовые руды);
2 – гидротермальные руды, предположительно связанные с базитовым магматизмом (23 – Абрамовское, Россия – кимуритлантанитовые руды);
3, 4 – россыпные месторождения: 3 – монацитовые (24 – Дип Сандс, США), 4 – ксенотимовые (25 – россыпи Малайзии);
5, 6 – хемогенно-осадочные руды: 5 – железомарганцевые конкреции и корки дна океанов (26 – северо западная часть Тихого океана), 6 – апатитизированный костный детрит (27 – Россия);
7 – гипергенные глинистые руды кор выветривания (28 – Хуашань, 29 – Гупошань, 30 – Хелинь, 31 – Лонгнан, Китай; 32 – Теняковское, Россия);
8 – гидротермальные глинистые руды в аргиллизитах (33 – Дольна Вес, Словакия; 34 – Абрамовское, Россия);
9 – полигенные металлоносные угли (35 – Жижин, Китай; 36 – АдунЧулун, Монголия; 37 – Раковское, 38 – Павловское, 39 – Ванчинское, Россия);
10 – РЗЭ объекты неясного генезиса (40 – Дуглас Ривер, Канада – ксенотимовые руды).

Поля перспективности рудных объектов по составу РЗЭ: I – неперспективные, II – перспективные, III – высокоперспективные.



ВСЕРОССИЙСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМ. А. П. КАРПИНСКОГО

Спасибо за внимание

