

УДК 553.319; 553.048

DOI: 10.46698/VNC.2025.70.10.010

Оригинальная статья

Корреляционный метод подсчета ресурсов редкоземельных элементов на Камыш-Бурунском железородном месторождении Керченского бассейна

Ю.А. Ермаков^{id}, А.А. Самсонов^{id}, В.И. Старостин^{id},
И.П. Мамаев^{id}, В.Д. Шалимов^{id}

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Геологический
факультет, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1,
e-mail: killpor@ya.ru, samsonov@geol.msu.ru, vistar.geol@gmail.com,
giger3612@gmail.com, shalimov911@mail.ru

Статья поступила: 30.07.2024, доработана: 10.02.2025, принята к публикации: 14.02.2025

Резюме: Актуальность работы. Редкоземельные элементы (РЗЭ) являются стратегическим дефицитным видом сырья для отечественной экономики. Помимо разведки и ввода в эксплуатацию новых месторождений редкоземельного сырья, перспективным направлением исследований является оценка уже разведанных месторождений изначально не редкоземельной специализации (в частности, законсервированных) как потенциальных источников РЗЭ. **Цель исследования.** Подсчет ресурсов редкоземельных элементов на Камыш-Бурунском железорудном месторождении с применением косвенного корреляционного метода. **Методы исследования.** В работе представлен статистический метод подсчета прогнозных ресурсов РЗЭ категории P_3 на Камыш-Бурунском месторождении Керченского железорудного бассейна. Предлагаемый метод основан на установлении прямой значимой корреляции между содержаниями основного полезного компонента (Fe) и РЗЭ по данным химического анализа отобранных проб руд. Прогнозное среднее содержание РЗЭ в рудах месторождения определялось с помощью уравнения линейной регрессии по известным средним содержаниям железа. Прогнозные ресурсы РЗЭ рассчитаны на основе данных по запасам железа и соотношения между средними содержаниями железа и РЗЭ в рудах. **Результаты.** Рассчитано среднее содержание РЗЭ на Камыш-Бурунском месторождении, установлена прочная корреляционная связь содержаний РЗЭ с железом. Корреляционным методом посчитаны ресурсы РЗЭ для данного месторождения. Данный метод может быть применим для быстрой оценки и подсчета ресурсов редкоземельных элементов на других известных месторождениях изначально не редкоземельной специализации при совпадении следующих факторов: на месторождении выявлено повышенное содержание РЗЭ; на месторождении проводился подсчет запасов компонента, содержания которого потенциально могут коррелировать с содержаниями РЗЭ; месторождения обладают относительно простым геологическим строением и низким коэффициентом вариации содержаний основных компонентов; данные месторождения отработаны в незначительной степени и/или законсервированы.

Ключевые слова: редкоземельные элементы, Керченский бассейн, осадочные месторождения, подсчет ресурсов, корреляционный анализ.

Для цитирования: Ермаков Ю.А., Самсонов А.А., Старостин В.И., Мамаев И.П., Шалимов В.Д. Корреляционный метод подсчета ресурсов редкоземельных элементов на Камыш-Бурунском железорудном месторождении Керченского бассейна. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 119-131. DOI: 10.46698/VNC.2025.70.10.010

DOI: 10.46698/VNC.2025.70.10.010

Original paper

A correlation method for calculating rare earth element resources at the Kamysh-Burunsky iron ore deposit in the Kerch basin

Yu.A. Yermakov^{ID}, A.A. Samsonov^{ID}, V.I. Starostin^{ID},
I.P. Mamaev^{ID}, V.D. Shalimov^{ID}

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, 1 Leninskie Gory, 119991 Moscow,
Russian Federation,

e-mail: killpor@ya.ru, samsonov@geol.msu.ru, vistar.geol@gmail.com,
giger3612@gmail.com, shalimov911@mail.ru

Received: 30.07.2024, revised: 10.02.2025, accepted: 14.02.2025

Abstract: Relevance. Rare earth elements (REE) are a strategically scarce type of raw material for the Russian economy. In addition to the exploration and commissioning of new deposits of rare earth raw materials, a promising area of research is the assessment of already explored deposits of initially non-rare earth specialization (in particular, mothballed ones) as potential sources of REE, the purpose of the study. **Aim.** Calculation of rare earth element resources at the Kamysh-Burun iron ore deposit using an indirect correlation method. **Methods.** The paper presents a statistical method for calculating the forecast resources of the P₃ category of REE at the Kamysh-Burunskeye deposit of the Kerch iron ore basin. The proposed method is based on the establishment of a direct significant correlation between the contents of the main useful component (Fe) and REE according to the chemical analysis of the selected ore samples. The predicted average REE content in the ores of the deposit was determined using a linear regression equation based on known average iron concentrations. The projected REE resources are calculated based on data on iron reserves and the ratio between the average iron and REE contents in ores. **Results.** The average content of rare earth elements in the Kamysh-Burunskeye deposit has been calculated, and a strong correlation between the REE content and iron has been established. The REE resources for this deposit are calculated using the correlation method. This method can be used to quickly assess and calculate the resources of REE in other known deposits of initially non-rare earth specialization if the following factors coincide: an increased content of REE was detected at the deposit; reserves of a component were calculated at the deposit, the contents of which could potentially correlate with the contents of REE; deposits have a relatively simple geological structure and a low coefficient of variation in the contents. The main components; These deposits have been worked out to a minor extent and/or mothballed.

Keywords: rare earth elements, Kerch basin, sedimentary deposits, resource calculation, correlation analysis.

For citation: Yermakov Yu.A., Samsonov A.A., Starostin V.I., Mamaev I.P., Shalimov V.D. A correlation method for calculating rare earth element resources at the Kamysh-Burunsky iron ore deposit in the Kerch basin. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(1): 119-131. DOI: 10.46698/VNC.2025.70.10.010

Введение

Редкоземельные элементы являются стратегическим видом сырья для отечественной экономики, применяющимся в различных высокотехнологичных отраслях промышленности, однако современное состояние и степень освоенности минерально-сырьевой базы страны на данный момент не покрывают внутренний спрос в достаточной мере (что позволяет считать РЗЭ дефицитным видом сырья) (Страте-

гия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года). Несмотря на то, что на Россию приходится около 1/5 мировых ресурсов РЗЭ [Авдонин и др., 2005], а на баланс поставлено 28,7 млн т суммы триоксидов редкоземельных элементов ($\sum TR_2O_3$), нынешняя доля России в мировом производстве РЗЭ – всего около 0,9% (объем товарной добычи по данным на 2022 год – 2,6 тыс. т $\sum TR_2O_3$, единственным производителем является Ловозерский ГОК в Мурманской области) [Государственный доклад ..., 2023]. На данный момент ряд месторождений РЗЭ уже находится в процессе подготовки к эксплуатации (Томторское, Партомчоррское и др.). Помимо разведки и ввода в эксплуатацию новых месторождений редкоземельного сырья, перспективным направлением исследований является оценка уже разведанных месторождений изначально не редкоземельной специализации (в частности, законсервированных) как потенциальных источников РЗЭ.

Большая часть запасов РЗЭ в России приходится на магматогенные источники (а также на развивающиеся по ним коры выветривания). Однако повышенная концентрация РЗЭ на территории страны обнаруживается также в других источниках. В частности, значительное сосредоточение РЗЭ отмечается в осадочных железорудных бассейнах Азово-Черноморской, Западно-Сибирской и некоторых других осадочных рудных провинций [Некипелова и др., 2022]. Отдельный интерес представляет Керченский железорудный бассейн, так как, помимо обнаружения там повышенных содержаний РЗЭ, месторождения бассейна имеют очень высокую степень разведанности по основным компонентам руд, а также выгодное в инфраструктурном плане местоположение. Непосредственно объектом данного исследования является Камыш-Бурунское месторождение, относящееся к южной группе месторождений Керченского бассейна (рис. 1).

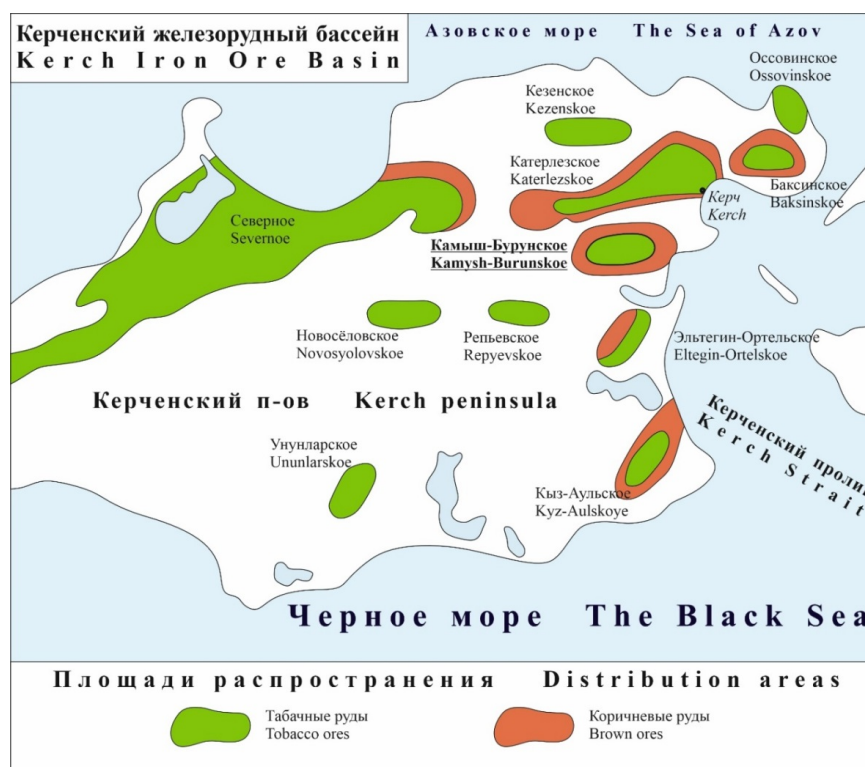


Рис. 1. Схема расположения месторождений в пределах Керченского железорудного бассейна [Григорьев, 1987] /

Fig. 1. The layout of deposits within the Kerch iron ore basin [Grigoryev, 1987]

Геологическое строение Камыш-Бурунского месторождения

Осадочные железорудные отложения Камыш-Бурунского месторождения контролируются одноименной мульдой, представляющей собой весьма пологую, шириной около 3,7 км, синклинальную складку, вытянутую в субширотном направлении на 7,5 км. Железные оолитовые руды месторождения среднекиммерийского возраста мощностью от 0 на периферии до 19,55 м в центре, имеют четкие границы как с подстилающими понтическими детритусовыми («фаленами») и мэотическими известняками, так и с перекрывающими верхнекиммерийскими пластичными бентонитовыми глинами (N_2k_3) (пьяченцкий век плиоцена по международной геохронологической шкале). Рудное тело имеет мощность до 19,55 м в центре мульды и выклинивается на ее периферии и характеризуется спокойным залеганием, от субгоризонтального в средней части до полого наклонного на крыльях, не более 5–6° (Попова В.И. и др. Геологический отчет с подсчетом запасов железных руд месторождений Южной группы Керченского бассейна, 1978).

Основные типы руд, встречающиеся на месторождениях Керченского бассейна [Холодов и др., 2012, 2014]:

1. Сидеритовые руды – наименее богатые железом (33,4% $FeO_{общ}$);
2. Табачные руды – первичные закисные оолитовые, хорошо сцементированные руды (38,4% $FeO_{общ}$);
3. Коричневые руды – представляют собой окисленные оолитовые руды, в большей степени обогащенные железом (48,1% $FeO_{общ}$);
4. Икряные руды – состоящие в основном из перемытых в прибрежных условиях псевдооолитов, наиболее обогащенных железом и, зачастую, покрытых черной коркой оксидов и гидроксидов марганца и железа (т.н. «пустынный загар») (52,3% $FeO_{общ}$).

Данная типизация осадочных руд месторождений Керченского железорудного бассейна опирается на их морфологические характеристики и в целом отражает химический состав.

На Камыш-Бурунском месторождении было проведено оконтуривание и подсчет запасов осадочных железных руд. Балансовые запасы Южной группы месторождений, в которую входит Камыш-Бурунское месторождение, обладают степенью разведанности по категории А в 80% от общего объема запасов. Балансовые запасы руды Камыш-Бурунского месторождения по категории А – 270 057 тыс. т против 326 552 тыс. т по категориям А+В+С₁ (Попова В.И. и др. Геологический отчет с подсчетом запасов железных руд месторождений Южной группы Керченского бассейна, 1978).

В ходе детальной разведки в 1947–54 гг. на Камыш-Бурунском месторождении было отобрано 8728 рядовых проб на 3 основных компонента (Fe, Mn, P). Также в 1974–1975 годах Симферопольским институтом минеральных ресурсов проведены анализы 380 проб исходных руд и продуктов их обогащения полуколичественным спектральным методом на 42 компонента: Fe, Mn, P, V, As, Ni, Co, Cr, Si, Al, Ca, Mg, K, Na, Ti, Ba, C, H, O, N, Y, F, Cl, Zn, Zr, Pb, Cu, Sr, Mo, Sn, Sb, Nb, La, Sc, Ag, Yb, W, Bi, Re, Ta, Cd, Tl. Проведенное комплексное исследование керченских руд однозначно указало на их многокомпонентный химический состав. Однако оно же выявило, что наряду с основными компонентами керченских железных руд, таки-

ми как Fe, Mn, Si, Ti, Al, P, Ca, Mg, S в значимых количествах присутствуют только V, Co, Ni (легирующие примеси) и As. Остальные элементы, в том числе и редкоземельные, присутствуют в концентрациях значительно ниже промышленных (по состоянию на 1975 год) (Попова В.И. и др. Геологический отчет с подсчетом запасов железных руд месторождений Южной группы Керченского бассейна, 1978).

Положительным аспектом химического состава руд в контексте извлечения железа или РЗЭ является относительно низкое содержание радиоактивных элементов [Некипелова и др., 2022].

Разработка месторождения шла в советское время и была прекращена в 90-е годы прошлого века, так как была признана нерентабельной (в связи с низкими содержаниями Fe, трудной обогатимостью и заметными содержаниями P и As) [Нестеровский, 2020]. В результате рудное тело месторождения частично затронуто эксплуатационными выработками (отработано около четверти объема руд). На данный момент разработаны новые методы переработки и обогащения труднообогатимых железных руд, в частности сидеритовых [Yur'ev et al., 2020; Zhu et al., 2022].

Характер накопления РЗЭ в рудах

В рудах Керченского бассейна основная концентрация редкоземельных элементов приходится на тонкую фракцию в икряных и, в несколько меньшей степени, коричневых рудах. Содержание редких земель в табачных рудах менее значительное, а в сидеритовых – наименьшее [Некипелова и др., 2022].

Накопление РЗЭ в морских обстановках (фосфориты, ЖМК и КМК, глубоко-водные красные глины) возможно при наличии достаточного количества адсорбирующего материала и незначительном привносе терригенного материала [Дубинин, 2006]. Аналогичность обстановки накопления осадков в пределах Керченского бассейна дает основание утверждать, что основной баланс РЗЭ Керченского бассейна имеет гидрогенное происхождение и был накоплен на этапе раннего диагенетического преобразования рудных осадков главным образом на фоне процессов сорбции-десорбции. При этом, возможно, частично РЗЭ были привнесены на этапе седиментогенеза коллоидными растворами. Первичный источник РЗЭ в бассейне седиментации может иметь различную природу. Например, накопление РЗЭ в бассейне Киммерийского моря может быть связано с размывом карбонатитовых массивов Украинского щита, обогащенных РЗЭ (например, Новополтавского или Октябрьского) [Фролов и др., 2005]. В то же время, повышенное содержание РЗЭ в рудах может быть свидетельством того, что источником рудного вещества был субмаринный гидротермальный процесс [Rudmin et al., 2018]. Повышенные содержания РЗЭ также отмечаются в водной фазе грязевых вулканов Керченско-Таманского региона, расположенных в меловых отложениях в зоне влияния крупных разломов [Чельноков и др., 2023]. В роли сорбентов РЗЭ выступали, в первую очередь, оксиды и гидрооксиды Fe^{3+} (в меньшей степени — аналогичные соединения Mn^{4+}), а также железистые смектиты. Помимо этого РЗЭ в рудах встречаются в виде изоморфной примеси в таких минералах, как монацит ((Ce, La, Nd, Th)[PO_4]), лопарит ((Na,Ce,Ca,Sr,Th)(Ti,Nb,Fe) O_3), и других; также РЗЭ могут иметь собственную минерализацию в виде субмикронных зерен фос-

фатных минералов группы рабдофана $((Ce,La)PO_4 \cdot H_2O)$ и ксенотима (YPO_4) , секущих по трещинам железорудные оолиты [Некипелова и др., 2022]. В некоторых минералах руд Керченского бассейна отмечается относительное обогащение тяжелыми редкоземельными элементами (в частности, в вивианите) [Nekipelova et al., 2023].

Одним из факторов, определяющих повышенное содержание РЗЭ в глинистых, преимущественно железисто-сметитовых [Голубовская, 1989] рудах Керченского бассейна является, вероятно, развитие ионно-абсорбционных процессов в железистых смектитах (общая формула: $M_x(Si_{4-x}Al_x)(Fe_2^{3+})O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$), сходных с процессами той же природы в каолиновых глинистых почвах редкоземельных месторождений Юга Китая. Благодаря кристаллической структуре смектитовых глин процессы абсорбции в них, протекают более интенсивно, чем в каолиновых глинах [Sato et al., 1992; Laird, 2006].

Методы исследования

В основе работы лежит метод косвенного подсчета прогнозных ресурсов РЗЭ на основе корреляции их содержания с содержанием железа, марганца, фосфора в отобранных пробах с использованием данных отчетов прошлых лет.

На месторождениях Южной группы Керченского железорудного бассейна и, в частности, на Камыш-Бурунском месторождении существуют весомые предпосылки использования корреляционного метода оценки компонентной базы. Во-первых – это относительно простое геологическое строение, во-вторых – однородность химического состава осадочных рудных тел, в-третьих – высокая степень разведанности месторождения, которое по современным меркам считается переразведанным.

В качестве рабочего материала использовались пробы, отобранные авторами и их коллегами на Камыш-Бурунском месторождении Керченского бассейна. Для подсчетов использовались результаты анализов 14 проб (табл. 1). Штуфные пробы отбирались в выходящих на дневную поверхность обнажениях рудных пластов (преимущественно «коричневых» руд, в меньшей степени – табачных руд) в секторах А и Е заброшенного карьера. Опробование икряных руд с указанной целью авторами не проводилось по причине их плохой обнаженности в бортах заброшенного карьера. Образцы соответствуют верхним горизонтам рудного пласта. Затем пробы сокращались (с истиранием в яшменных ступках и квартованием до массы 5–10 г) и анализировались методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на оборудовании «ELEMENT 2 ThermoFinnigan», принадлежащим МГУ, с получением данных по содержанию *Fe, Mn, P, As, РЗЭ (Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu)*. Результаты анализов приведены в таблице 1.

Также использовался геологический отчет В.И. Поповой и коллег 1978 г., в котором указаны содержания ряда элементов (железа, марганца и фосфора) во всех скважинах и разведочных выработках, а также средние содержания и коэффициенты вариации этих элементов для всего месторождения.

Таблица 1 / Table 1

Содержания основных элементов (%) и РЗЭ (ppm, миллионная доля или г/т) по результатам химических анализов /
The content of the main elements (%) and REE (ppm, millionth part or g/t) based on the results of chemical analyses

	Fe, %	MnO, %	As, %	P ₂ O ₅ , %	Y, ppm	La, ppm	Ce, ppm	Pr, ppm	Nd, ppm	Sm, ppm	Eu, ppm	Gd, ppm	Tb, ppm	Dy, ppm	Ho, ppm	Er, ppm	Tm, ppm	Yb, ppm	Lu, ppm	РЗЭ, ppm
1	39,1	2,2	0,108	2,3	76	104	195	27,4	115	27,8	6,6	23,5	3,7	19,3	3,7	9,9	1,3	8,2	1,0	622,9
2	42,8	0,8	0,134	2,6	81	103	228	28,5	114	28,0	7,0	25,4	3,9	19,8	3,8	10,8	1,3	8,7	1,1	664,6
3	45,4	1,4	0,145	2,5	100	128	264	33,9	143	34,0	8,1	29,6	4,5	23,4	4,5	12,4	1,5	10,0	1,2	798,4
4	36,0	0,7	0,119	1,0	73	97	292	25,9	110	24,8	6,0	22,4	3,3	17,4	3,2	8,6	1,2	7,0	0,9	692,5
5	39,0	0,8	0,102	0,9	73	93	276	25,8	107	24,9	6,0	22,1	3,3	17,6	3,1	8,9	1,2	7,4	1,0	670,2
6	36,1	2,5	0,076	0,8	90	107	296	28,5	117	27,6	6,9	24,8	3,8	20,9	4,0	9,7	1,4	9,0	1,2	749,0
7	42,6	0,2	0,100	1,0	90	110	273	33,6	130	31,0	7,1	29,5	4,4	24,1	4,1	10,7	1,4	9,0	1,2	758,8
8	43,8	1,6	0,044	0,9	83	91	212	24,6	100	22,0	5,5	23,2	3,3	17,4	3,3	8,3	1,2	7,0	0,9	602,5
9	41,3	1,5	0,034	1,1	89	88	222	25,3	100	24,2	5,8	24,5	3,5	19,3	3,7	9,4	1,4	7,7	1,1	624,7
10	22,9	0,1	0,016	0,6	53	53	136	15,9	65	14,8	3,6	15,1	2,2	11,8	2,2	5,8	0,9	4,9	0,7	386,3
11	66,2	0,7	0,096	0,8	122	111	196	30,8	124	29,0	7,2	30,0	4,4	24,9	4,8	12,4	1,8	10,4	1,4	710,3
12	63,6	0,8	0,128	0,9	116	142	370	41,9	169	37,9	8,6	37,9	5,1	26,3	4,9	12,2	1,8	9,5	1,3	984,5
13	42,5	0,5	0,066	0,8	76	76	178	22,2	90	20,8	4,6	20,4	3,0	16,3	3,1	8,0	1,2	6,6	1,0	526,9
14	26,2	0,2	0,020	0,4	72	79	189	22,0	90	20,8	4,6	20,4	2,8	15,7	3,0	7,5	1,2	6,3	0,9	535,0
Ср./ cf. m	42,0	1,0	0,1	1,2	85,4	98,7	237,7	27,6	112,6	26,2	6,3	24,9	3,7	19,6	3,7	9,6	1,3	8,0	1,1	666,4

Результаты исследования

Согласно полученным данным, содержание РЗЭ в пробах выше в 3–6 раз их кларковых значений. Среднее содержание суммы редких земель по пробам – 666 г/т. Нормирование средних содержаний РЗЭ в пробах (на PAAS – «постархейский австралийский референтный сланец») [Тейлор, Мак-Леннан, 1988] и построение спайдер-диаграммы (рис. 2) демонстрируют, что наибольшее относительное обогащение приходится на элементы от неодима до диспрозия (элементы, переходные от легких РЗЭ к тяжелым), с особенно выраженным пиком по европию. Одним из объяснений значительно повышенных содержаний европия может быть участие гидротермального процесса в привносе РЗЭ в бассейн седиментации [Дубинин, 2006].

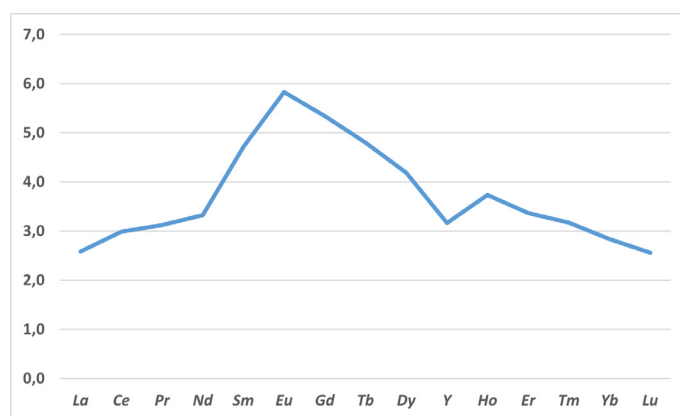


Рис. 2. Спайдер-диаграмма нормированных средних содержаний РЗЭ по пробам /
Fig. 2. Spider diagram of normalized average REE contents by samples

Коэффициент вариации для суммы редких земель составил 18,7% (весьма равномерное распределение). Далее приведены рассчитанные авторами / В.И. Поповой (по длинной и короткой осям мульд) коэффициенты вариации (дисперсии) для некоторых основных и примесных компонентов руд:

- железо – 19% / 18-22%,
- марганец – 179% / 130-229%,
- фосфор – 91% / 37-43%.

Полученные авторами результаты оказались близки к результатам В.И. Поповой. Исключением является фосфор, коэффициент вариации которого оказался существенно выше. При этом другими исследователями была выявлена прочная положительная связь содержаний фосфора с железом (коэффициент корреляции 0,75) [Sokol et al., 2022], в то время как по нашим пробам значительная корреляция не установлена.

Проверка наличия прямой или обратной корреляции и построение линейных диаграмм зависимостей по разным РЗЭ с железом, марганцем, фосфором и мышьяком дала следующие результаты (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Коэффициент корреляции основных элементов с РЗЭ /
Correlation coefficient of the main elements with REE

Железо / Iron	0,71
Марганец / Manganese	0,24
Фосфор / Phosphorus	0,29

Значение $K_{\text{кор}}$ 0,7-0,9 считается высокой корреляцией (0,5-0,7 – средняя; 0,2-0,5 – слабая). Уравнение регрессии суммы РЗЭ с железом (рис. 3) имеет хорошую прямую корреляцию (0,71 и 0,73 соответственно). Связь между церием и железом – слабая (0,42); а для остальных РЗЭ – высокая (в диапазоне 0,72-0,91). Корреляция содержания РЗЭ с фосфором и марганцем в наших пробах отсутствует.

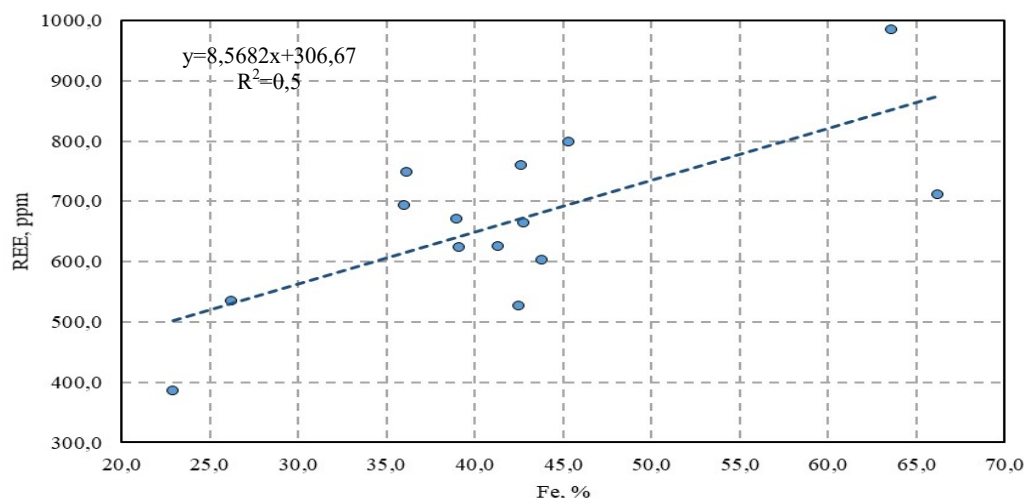


Рис. 3. График зависимости РЗЭ от железа /

Fig. 3. Graph of REE dependence on iron

Среднее содержание железа по нашим пробам $C_{Fe} = 42\%$. Согласно данным В.И. Поповой, среднее содержание железа по всем категориям всех блоков руд $C_{Fe} = 39,3\%$. Большее значение по нашим пробам объясняется тем, что пробы отбирались в основном из горизонта коричневых руд. Запасы приняты как $Q_{Fe} = 239$ млн т железной руды (сумма балансовых запасов по категориям А, В и C_1 за вычетом отработанных руд, указанных в паспорте месторождения, составленного в 1983 г.).

Рассчитанное среднее содержание суммы РЗЭ по собранным авторами пробам $C_{REE} = 666$ г/т (среднее содержание суммы легких редкоземельных элементов – 509 г/т, что типично для морских обстановок накопления РЗЭ). Пользуясь формулой уравнения регрессии из полученного графика:

$$y = 8,568 \cdot x + 306,67, \quad (1)$$

(где y – содержание РЗЭ, x – содержание железа), можно рассчитать среднее содержание РЗЭ для всего объема руды, т.к. из отчета В.И. Поповой известно среднее содержание железа по объему.

Полученное среднее содержание суммы РЗЭ по всему месторождению $C_{REE} = 643$ г/т. Для сравнения, средние содержания РЗЭ в других осадочных источниках: в каолиновых корах выветривания – 1025 г/т, в абиссальных железомарганцевых конкрециях – 2272 г/т, в морских фосфоритах – 771 г/т, в глубоководных красных глинах – 740 г/т [Невеская и др., 2003]. Сопоставлением полученного среднего содержания РЗЭ по месторождению и запасов железных руд Q_{Fe} были получены потенциальные ресурсы суммы РЗЭ $Q_{REE} = 154$ тыс. т по категории P_2 (табл. 3). Мировые запасы оцениваются примерно в 106 млн т на 2022 год в пересчете на сумму триоксидов РЗЭ [Государственный доклад ..., 2023].

Таблица 3 / Table 3

**Характеристика подсчитанных потенциальных ресурсов РЗЭ /
Characteristics of the calculated potential REE resources**

	Y	La	Ce	ΣLREE	ΣHREE	ΣREE
Ср. сод РЗЭ при 39,3 % Fe, г/т. / Cf. REE content at 39.3 % Fe, g/t.	82,4	95,3	229,5	491,5	151,9	643,0
Ресурсы РЗЭ на 239 млн т железной руды, тыс. т / REE resources for 239 million tons of iron ore, thousand tons	20,0	23,0	55,0	117,5	36,3	153,7

Можно предположить, что устойчивая корреляция редкоземельных элементов с железом, связана, главным образом, с сорбцией редкоземельных элементов на (окси)гидроксидах Fe.

В целом, возможность получения редкоземельных элементов из различных нетрадиционных источников изучается давно (в частности, предложена технология извлечения РЗЭ из хвостов железорудных месторождений гидрометаллургическим методом) [Peiravi et al., 2020]. Применительно к рудам Керченского бассейна, для извлечения РЗЭ предложено несколько различных технологий (простое выщелачивание, выщелачивание с биогенной дефосфоризацией и др.) [Некипелова и др., 2022]. Потенциально возможно извлекать РЗЭ из сидеритовых руд.

Выводы

Содержание и характер распределения РЗЭ в морских железистых осадках сложного фазового состава Керченского бассейна являются результатом действия трех главных процессов: (1) аккумуляция аллотигенных (детритовых) РЗЭ-содержащих минералов, (2) упомянутая выше сорбция редкоземельных элементов на Fe(Mn)-(окси)гидроксидах и, частично, на глинистом веществе и (3) привнос аутигенных минералов (фосфатов) РЗЭ в ходе диагенеза осадка.

Полученные приблизительные данные по ресурсам РЗЭ на Камыш-Бурунском месторождении Керченского железорудного бассейна (которое имеет высокую степень разведанности, а также выгодное в логистическом плане местоположение) могут служить подтверждением его потенциальной ценности в роли источника редкоземельного сырья дополнительного к традиционным.

Практическое подтверждение полученных авторами результатов может указать на возможность применения данного метода косвенного подсчета ресурсов РЗЭ и для других аналогичных месторождений Азово-Черноморской или Западно-Сибирской железорудных провинций нашей страны (в случае их достаточной разведанности) при совпадении следующих факторов: на месторождении выявлено повышенное содержание РЗЭ; на месторождении проводился подсчет запасов компонента, содержания которого потенциально могут коррелировать с содержаниями РЗЭ; месторождения обладают относительно простым геологическим строением и низким коэффициентом вариации содержаний основных компонентов; данные месторождения отработаны в незначительной степени и/или законсервированы.

Литература

1. Авдонин В.В., Бойцов В.Е., Григорьев В.М., Семинский Ж.В., Солодов Н.А., Старостин В.И. Месторождения металлических полезных ископаемых. М.: Трикта, 2005. – 720 с.
2. Голубовская Е.В. Геоминералогия керченских железорудных месторождений: дис. канд. геол.-минер. наук: 04.00.21 / Голубовская Елена Викторовна. – М.: ГИН РАН, 1989. – 232 с.
3. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 году». / Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. М.: Роснедра, 2023. – 640 с.
4. Григорьев В.М. Керченский железорудный бассейн. // Горная энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1987. – 592 с.
5. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в Океане. М.: Наука, 2006. – 360 с.
6. Невеская Л.А., Гончарова И.А., Ильина Л.Б., Парамонова Н.П., Хондкариан С.О. О стратиграфической шкале неогена восточного Паратетиса. // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2003. – Т. 11. № 2. – С. 3–26.
7. Некипелова А.В., Сокол Э.В., Кох С.Н., Филиппова К.А. Керченские осадочные железные руды – нетрадиционный источник Nd и MREE: особенности и перспективы. // Руды и металлы. – 2022. – № 1. – С. 106–120.
8. Нестеровский В.А. Уникальный промышленно-генетический тип осадочных месторождений. // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2020. – Т. 16. № 1. – С. 54–68.
9. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. / Пер. с англ. Р.Н. Соболева, Л.Т. Соболевой, ред. Л.С. Бородин. – М.: Мир, 1988. – 381 с.
10. Фролов А.А., Лапин А.В., Толстов А.В., Зинчук Н.Н., Белов С.В., Бурмистров А.А. Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минерагения, прогноз). М.: НИИ-Природа, 2005. – 540 с.
11. Холодов В.Н., Голубовская Е.В., Недумов Р.И. Киммерийская железорудная провинция причерноморья, условия ее формирования и перспективы. // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2014. – № 3. – С. 5–35.
12. Холодов В.Н., Недумов Р.И., Голубовская Е.В. Фациальные типы осадочных железорудных месторождений и их геохимические особенности. // Литология и полезные ископаемые. – 2012. – № 6. – С. 503–531.
13. Челноков Г., Харитонов Н.А., Лаврушин В., Айдаркожина А.С., Женг Г. Редкоземельные элементы в водах грязевых вулканов Керченско-Таманского региона. // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2023. – Т. 63. № 5. – С. 58–71. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-5-58-71.
14. Laird D.A. Influence of layer charge on swelling of smectites. // Applied Clay Science. – 2006. – Vol. 34. – pp. 74–87.
15. Nekipelova A., Kokh S.N., Sokol E., Kozmenko O. Major and trace element signatures in lagoon vivianite: a case study from the Kerch ooidal ironstones. // In book: XIII General Meeting of the Russian Mineralogical Society and the Fedorov Session. – 2023. – pp. 372–381. – DOI: 10.1007/978-3-031-23390-6_47.
16. Peiravi M., Dehghani F., Ackah L., Baharlouei A., Godbold J., Liu J., Mohanty M., Ghosh T. A review of rare-earth elements extraction with emphasis on non-conventional sources: coal and coal byproducts, iron ore tailings, apatite, and phosphate byproducts. // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2020. – Vol. 38. – 27 p.
17. Rudmin M., Mazurov A., Banerjee S. Origin of ooidal ironstones in relation to warming events: cretaceous-eocene bakchar deposit, south-east Western Siberia. // Marine and Petroleum Geology. – 2018. – Vol. 100. – С. 309–325. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2018.11.023.

18. Sato T., Watanabe T., Otsuka R. Effects of layer charge, charge location, and energy change on expansion properties of dioctahedral smectites. // *Clays and Clay Minerals*. – 1992. – Vol. 40. – pp. 103–113.
19. Sokol E., Kokh S.N., Kozmenko O., Nekipelova A. Geochemistry and mineralogy of rare earth elements in high-phosphorus ooidal ironstones: a case study of the Kamysh-Burun deposit (Azov-Black Sea iron province). // *Ore Geology Reviews*. – 2020. – Vol. 127. No. 3–4. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103827.
20. Yur'ev B.P., Dudko V.A., Korelina E. Optimization of siderite ore sintering operation conditions. // *Materials Science Forum*. – 2020. – Vol. 989. – pp. 417–422. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.989.417.
21. Zhu X., Han Y., Sun Y., Gao P., Li Y. Thermal Decomposition of siderite ore in different flowing atmospheres: phase transformation and magnetism. // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. – 2022. – Vol. 44. No. 3. – pp. 1–8. – DOI: 10.1080/08827508.2022.2040498.

References

1. Avdonin V.V., Boytsov V.E., Grigoryev V.M., Seminsky Zh.V., Solodov N.A., Starostin V.I. *Ore Deposits of Metallic Mineral Resources*. Moscow. Triksa. 2005. 720 p. (In Russ.)
2. Golubovskaya E.V. *Geominalogy of the Kerch Iron Ore Deposits*. Dissertation of Cand. geol.-mineral. sciences. 04.00.21. Moscow. GIN RAS. 1989. 232 p. (In Russ.)
3. State report On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2022. Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation. Moscow. Rosnedra. 2024. 640 p. (In Russ.)
4. Grigoryev V.M. Kerch iron ore basin. *Mining Encyclopedia*. Moscow. Soviet Encyclopedia. 1987. 592 p. (In Russ.)
5. Dubinin A.V. *Geochemistry of rare earth elements in the Ocean*. Moscow. Nauka. 2006. 360 p. (In Russ.)
6. Neveskaya L.A., Goncharova I.A., Ilyina L.B., Paramonova N.P., Khondkaryan S.O. On the Stratigraphic Scale of the Neogene of the Eastern Paratethys. *Stratigraphy. Geological Correlation*. 2003. Vol. 11. No. 2. pp. 3–26. (In Russ.)
7. Nekipelova A.V., Sokol E.V., Kokh S.N., Filippova K.A. Kerch sedimentary iron ores – a non-traditional source of Nd and MREE: features and prospects. *Ores and Metals*. 2022. No. 1. pp. 106–120. (In Russ.)
8. Nesterovsky V.A. Unique industrial-genetic type of sedimentary deposits. *Geology and Mineral Resources of the World Ocean*. 2020. Vol. 16. No. 1. pp. 54–68. (In Russ.)
9. Taylor S.R., MacLennan S.M. *Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Translated from English by R.N. Sobolev, L.T. Soboleva, edited by L.S. Borodin. Moscow. Mir. 1988. 381 p. (In Russ.)
10. Frolov A.A., Lapin A.V., Tolstov A.V., Zinchuk N.N., Belov S.V., Burmistrov A.A. *Carbonatites and kimberlites (relationships, mineralogeny, forecast)*. Moscow. NIA-Priroda. 2005. 540 p. (In Russ.)
11. Kholodov V.N., Golubovskaya E.V., Nedumov R.I. Cimmerian iron ore province of the Black Sea coast, conditions of its formation and prospects *Geology and Mineral Resources of the World Ocean*. 2014. No. 3. pp. 5–35. (In Russ.)
12. Kholodov V.N., Nedumov R.I., Golubovskaya E.V. Facies types of sedimentary iron ore deposits and their geochemical features. *Lithology and Mineral Resources*. 2012. No. 6. pp. 503–531. (In Russ.)
13. Chelnokov G., Kharitonova N.A., Lavrushin V., Aydarkozhina A.S., Zheng G. Rare earth elements into the aqueous phase of mud volcanoes of the Kerch-Taman region. *Moscow University Geology Bulletin*. 2023. Vol. 63. No. 5. pp. 58–71. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-5-58-71. (In Russ.)
14. Laird D.A. Influence of layer charge on swelling of smectites. *Applied Clay Science*. 2006. Vol. 34. pp. 74–87.

15. Nekipelova A., Kokh S.N., Sokol E., Kozmenko O. Major and trace element signatures in lagoon vivianite: a case study from the Kerch ooidal ironstones. In book: XIII General Meeting of the Russian Mineralogical Society and the Fedorov Session. 2023. pp. 372–381. DOI: 10.1007/978-3-031-23390-6_47.
16. Peiravi M., Dehghani F., Ackah L., Baharlouei A., Godbold J., Liu J., Mohanty M., Ghosh T. A review of rare-earth elements extraction with emphasis on non-conventional sources: coal and coal byproducts, iron ore tailings, apatite, and phosphate byproducts. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020. Vol. 38. 27 p.
17. Rudmin M., Mazurov A., Banerjee S. Origin of ooidal ironstones in relation to warming events: cretaceous-eocene bakchar deposit, south-east Western Siberia. *Marine and Petroleum Geology*. 2018. Vol. 100. pp. 309–325. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2018.11.023.
18. Sato T., Watanabe T., Otsuka R. Effects of layer charge, charge location, and energy change on expansion properties of dioctahedral smectites. *Clays and Clay Minerals*. 1992. Vol. 40. pp. 103–113.
19. Sokol E., Kokh S.N., Kozmenko O., Nekipelova A. Geochemistry and mineralogy of rare earth elements in high-phosphorus ooidal ironstones: a case study of the Kamysh-Burun deposit (Azov-Black Sea iron province). *Ore Geology Reviews*. 2020. Vol. 127. No. 3–4. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103827.
20. Yur'ev B.P., Dudko V.A., Korelina E. Optimization of siderite ore sintering operation conditions. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 989. pp. 417–422. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.989.417.
21. Zhu X., Han Y., Sun Y., Gao P., Li Y. Thermal decomposition of siderite ore in different flowing atmospheres: phase transformation and magnetism. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2022. Vol. 44. No. 3. pp. 1–8. DOI: 10.1080/08827508.2022.2040498.