ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(9):135-150
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 550.43 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_135

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МАЙКУБЕНЬСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА (КАЗАХСТАН)

А.Н. Копобаева[1], Г.Г. Блялова[1], А. Амангелдікызы[1], Р.Х. Сунгатуллин[2], Н. Оразбек[1]

[1] Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
Караганда, Казахстан, e-mail: a.amangeldykyzy@ktu.edu.kz
[2] Казанский федеральный университет,
Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казань, Россия

Аннотация: В связи с постепенным истощением ресурсов традиционных металлических полезных ископаемых и ограниченностью остаточных запасов актуален поиск новых потенциальных источников. Целью работы является оценка содержания элементов-примесей в углях Майкубеньского угольного бассейна и определение источников их накопления в углях. Результаты получены путем интерпретации данных по 10 пробам Талдыкольского и Сарыкольского месторождений. Аналитические исследования проводились методами ИНАА в НИ ТПУ г. Томск, Россия. Геохимический анализ позволил получить достоверные результаты; оценена степень обогащения. Угли месторождения Сарыколь обогащены (2<КК<5) литофильными элементами Cs, Rb и халькофильным элементом Ag. Для углей месторождения Талдыколь установлены незначительные превышения над кларком (0,5<КК<2) для REE, Br, Th, Hf, Ba, Sr, Cs, Ta, Co, Sb, также выявлены выские содержания (2<КК<5) для литофильных элементов U, Rb, Cr, Sc и халькофильных элементов Ag, Zn. Также установлены Н-тип распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) в углях Майкубеньского бассейна; соотношение LaN/LuN угля колеблется от 0,27 до 0,64, что указывает на характерное преобладание тяжелых лантаноидов над легкими в углях (Н-тип). По особенностям нормированных по хондриту кривых распределения РЗЭ в Майкубеньском бассейне установлены три особенности: присутствие положительных Ce-, Eu-аномалий; отсутствие Eu-минимума; распределение РЗЭ в юрских углях бассейна Майкубень в основном проявляется как распределение Н-типа с положительной аномалией Lu.

Ключевые слова: уголь, РЗЭ, Майкубеньский бассейн, Казахстан, элементы-примеси, распределение, кларк, аномалии.

Для цитирования: *Копобаева А. Н., Блялова Г. Г., Амангелдікызы А., Сунгатуллин Р. Х., Оразбек Н.* Геохимические особенности Майкубеньского угольного бассейна (Казахстан) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 9. – С. 135–150. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_135.

Geochemical peculiarities of the Maikubensky Coal Field, Kazakhstan

A.N. Kopobaeva[1], G.G. Blyalova[1], A. Amangeldikyzy[1], R.Kh. Sungatullin[2], N. Orazbek[1]

[1] Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan,
e-mail: a.amangeldykyzy@ktu.edu.kz
[2] Kazan (Volga Region) Federal University,
Institute of Geology and Unconventional Technologies, Kazan, Russia

© А.Н. Копобаева, Г.Г. Блялова, А. Амангелдікызы, Р.Х. Сунгатуллин, Н. Оразбек. 2025.

Abstract: Gradual depletion of resources of standard metallic minerals and limitation of current reserves urges exploration activities to find new potential sources of metals. This study estimated the content and sources of impurity elements in coal of the Maikubensky Coal Field. The results were obtained from interpretation of data on 10 samples from the Taldykol and Sarykol deposits. The analyses were performed using the NAA methods at the Tomsk Polytechnic University in Russia. The geochemical analysis produced the reliable result, and the rates of concentration of different elements were estimated. The Sarykol coal is rich (2<Clarke Concentration<5) in lithophylic elements Cs and Rb, and chalcophile element Ag. For the Taldykol coal, a slight exceedance of the Clarke Concentration (0.5<CC<2) is observed in case of REE, Br, Th, Hf, Ba, Sr, Cs, Ta, Co and Sb, and high concentrations (2<CC<5) of lithophylic elements U, Rb, Cr and Sc and chalcophile elements Ag and Zn are revealed. Furthermore, the normal distribution of rare earth elements (REE) is found in the Maikubensky coal; the ratio LaN/LuN varies from 0.27 to 0.64, which means a characteristic dominance of heavy over light lanthanides in coal (normal distribution). The chondrite-normalized REE concentration curves plotted for the Maikubensky Coal Field exhibit three peculiarities: (a) positive Ce and Eu anomalies; (b) absence of Eu minimum; (c) mostly normal distribution of REE with positive Lu anomaly in Jurassic coal of the Maikubensky Field.

Key words: coal, REE, Maikubensky Coal Field, Kazakhstan, impurity elements, distribution, Clarke Concentration, anomalies.

For citation: Kopobaeva A. N., Blyalova G. G., Amangeldikyzy A., Sungatullin R. Kh., Orazbek N. Geochemical peculiarities of the Maikubensky Coal Field, Kazakhstan. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(9):135-150. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_135.

Введение

Уголь, как органическая порода, обладает способностью накапливать большое количество элементов-примесей, в том числе РЗЭ, при определенных геологических условиях [1—6]. Содержание металлических элементов в угле, особенно в угольной золе, может достигать уровня традиционных месторождений, и, таким образом, уголь и отходы его сжигания могут иметь экономическую ценность для добычи и использования [7]. Особенности геохимии углей, распределения элементов-примесей, их формы нахождения и геологические факторы обогащения углей критическими элементами определяют сложность разведки, добычи и металлургии, которые важны для извлечения критических металлов из угольных отложений.

Казахстан обладает огромными запасами углей, и стабильный рост добычи и потребления в стране позволяет рассматривать угли как нетрадиционный источник различных попутных компонентов. Так, в углях Центрального Казахстана, согласно проведенным нами исследованиям [8—10], отмечены повышенные концентрации для глинистых прослоев пласта $к_7$ Карагандинского угольного бассейна: Li — 137,6 г/т, Sr — 198,6 г/т, V — 239,0 г/т, Zr — 60 г/т, Th —13,2 г/т, Sc — 9,6 г/т, Ga — 31,1 г/т; содержание этих же элементов в углях отличается более низкими показателями по сравнению с глинистыми прослоями того же пласта: Li — 15,44 г/т, Sr — 63,20 г/т, V — 36,98 г/т, Zr — 46,64 г/т, Th — 1,21 г/т, Sc — 5,48 г/т, Ga — 3,65 г/т. Максимальные концентрации элементов, установленные в частных пробах

углей месторождения Шубарколь, составляют для La — 205 г/т, Ce — 644 г/т, Sm — 227 г/т, д Eu — 79 г/т, Tb — 97 г/т, Yb — 358 г/т, Lu — 59 г/т. Угли и золошлаковые отходы углей данных месторождений при дополнительных исследованиях могут рассматриваться как нетрадиционные источники комплексного сырья для этих элементов.

Достоверная оценка среднего содержания редкоземельных элементов в углях в настоящее время для большинства угольных бассейнов и месторождений Казахстана нуждается в уточнении с использованием современных методов исследований. В странах с развитой экономикой (США, Европа, Австралия, Китай) редкометалльный потенциал в органическом веществе оценен и результаты опубликованы в многочисленных работах, где показано, что отходы использования углей также могут содержать высокие, в отдельных случаях промышленно значимые концентрации элементов-примесей [1—7, 11—13]. Но в настоящее время пока нет достаточной геологической информации о накоплении элементов-примесей в угольных пластах, о формах их нахождения и механизмах концентрирования этих элементов в углях Казахстана. В связи с этим данная работа является весьма актуальной, поскольку в ней приведены результаты исследований по содержанию химических элементов, их распределении в углях бассейна юрского периода — Майкубень, а также об условиях образования и накопления их в углях бассейна. Юрский период, наряду с каменноугольным, является важной эпохой углеобразования в Центральном Казахстане [10]. Установлено, что породы обрамления — древние комплексы, принимали активное участие при формировании геохимического фона осадочных пород весьма крупного по запасам юрских углей месторождения Шубарколь и обогащении критическими элементами угольных пластов [9, 10, 14]. Как указывают некоторые исследователи [12, 13], магматические породы из области обрамления угольных бассейнов являются одним из основных геологических факторов, которые могут вызвать повышение содержания РЗЭ и элементов-спутников в углях.

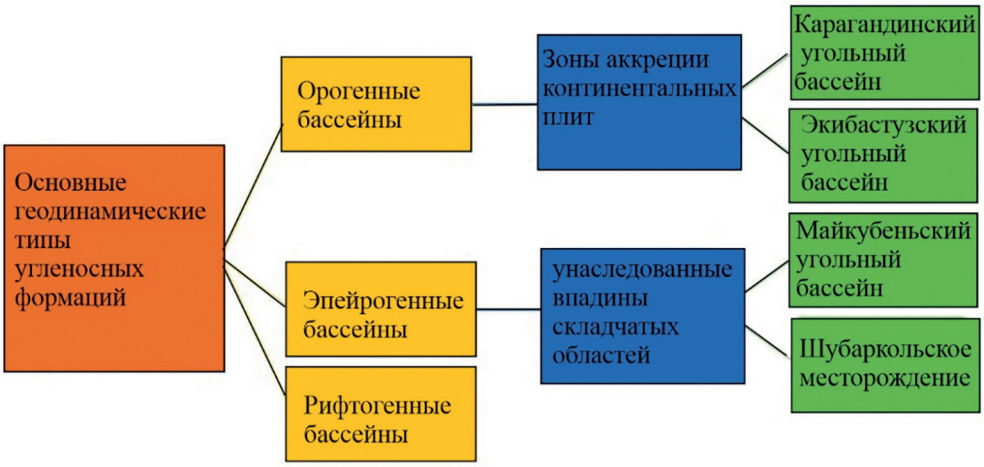


Рис. 1. Фрагмент классификации угленосных формаций в применении к угольным бассейнам Центрального Казахстана по [17]

Fig. 1. A fragment of the classification of coal-bearing formations applied to the coal basins of Central Kazakhstan according to [17]

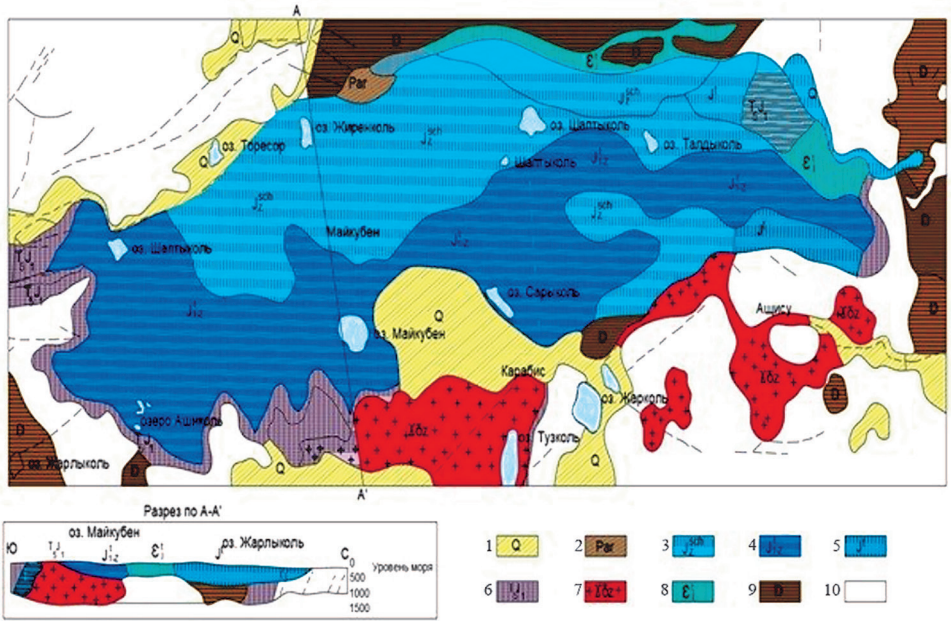
Цель настоящей работы — изучение условий образования Майкубеньского угольного бассейна, локализованного в восточной части Центрального Казахстана, исследование геохимических особенностей углей и геологических факторов, влияющих на особенности формирования геохимического фона.

Формирование угленосных бассейнов связано с развитием депрессионных структур, возникавших и ныне возникающих в различных геодинамических обстановках. Во многих случаях такие бассейны занимают лишь часть территорий, пребывающих в данное время в определенной геодинамической ситуации. Фрагмент классификации угленосных формаций в применении к угольным бассейнам Центрального Казахстана приведен на рис. 1.

Согласно исследованиям [17, 18], Майкубеньский угольный бассейн и Шубаркольское месторождение относятся к бассейнам в унаследованных впадинах складчатых областей, поскольку они развивались над древними осадочными комплексами, входящими в структурный каркас аккреционно-складчатых областей, и отделены от предшествовавшего им бассейна поверхностями структурного и значительного стратиграфического несогласия. Эпейрогенные бассейны занимают внутренние квазистабильные области континентов, где развита обстановка формирования широких надрифтовых синеклиз и иных прогибов, как следствие поверхностных реакций на медленные глубинные термоплотностные изменения.

Месторождения Майкубень и Шубарколь образовались в эпоху второго максимума углеобразования в Казахстане, связанного с раннесреднеюрским периодом. В это время в континентальных аллювиально-озерно-болотных условиях сформировались высококачественные, малозольные угли, и к началу поздней юры углеобразование прекратилось. Формирование среднеюрской угленосной толщи в Майкубеньском бассейне, представленной шоптыкольской и жиренкольской свитами, приходится на байос-бат. Анализ литературных данных помог выявить, что в целом среднеюрский этап угленакопления имел широкое распространение и значительную интенсивность, как и раннеюрский. Наиболее крупным месторождением, образовавшимся в период среднеюрского угленакопления, является Шоптыкольское (Майкубеньский бассейн). На границе средней и поздней юры угленакопление повсеместно прекратилось [18]. Месторождения Майкубеньского бассейна сформировались в крупных грабеноподобных впадинах, возникших в период активизации платформы и обычно ограниченных сбросами с одной или с двух сторон. Месторождения Майкубеньского бассейна находятся внутри Казахской складчатой системы. Все эти бассейны и месторождения характеризуются мощными угольными пластами. Они окаймлены горными сооружениями, представляющими собой крупные антиклинории, и испытывали длительное устойчивое погружение в мезозое и кайнозое. Площади угленакопления в их границах были обширными, но интенсивность этого процесса была меньшей, чем в месторождениях предыдущего типа, в связи с чем и мощности пластов здесь значительно ниже.

Геологическая характеристика бассейна. Майкубеньский бассейн объединяет несколько месторождений: Майкубень, Шоптыколь, Сарыколь, Талдыколь. Площадь Майкубеньского буроугольного бассейна находится в зоне постепенного перехода от области типичного мелкосопочника Центрального Казахстана к области равнины Прииртышья, граничащей с Западно-Сибирской низменностью. Бассейн представ-



1 – современные отложения; 2 – нижний олигоцен; 3 – шоптыкольская свита; 4 – талдыкольская свита; 5 – сарыкольская свита; 6 – свита базального конгломерата; 7 – ранневарисцийский интрузивный косплекс; 8 – турнейский ярус; 9 – девонские отложения; 10 – додевонские отложения

Рис. 2. Геологическая карта Майкубеньского угольного бассейна
Fig. 2. Geological Map of the Maikuben Coal Basin

ляет собой пологоувалистую холмистую равнину, пересеченную речными долинами, вытянутыми в широтном направлении (рис. 2).

В геологическом строении бассейна участвуют мезозойские отложения, подразделяющиеся на 4 свиты (снизу вверх): ащикольскую, талдыкольскую, шоптыкольскую, жиренкольскую. Общая мощность мезозойских отложений составляет 1000 м, мощность отдельных свит: ащикольской — 200–750 м (пласт I-A-IV-A); талдыкольской — 170–340 м (I-T-IV-T); шоптыкольской — 190–290 м (I-Ш, II-Ш). На Шоптыкольском месторождении суммарная мощность угля в горизонтах (I-III, II- III) — 50–60 м.

Все угольные горизонты характеризуются сложным строением, хорошей выдержанностью по простиранию и резким изменением на коротких расстояниях мощности и строения. Угли Майкубеньского месторождения являются высоко метаморфизованными, гумусовыми. Массовая доля рабочей влаги в пластах колеблется от 9 до 19% и в среднем составляет 12%. Зольность углей в естественном состоянии колеблется в среднем по пластам от 17,2 до 28,7%. Но в связи со сложным строением угольных пластов засорение при добыче угля породными прослоями значительно и составляет 7—8%. Примечательно высокое содержание (24—32%) в золе углей компонента Al_2O_3. Поэтому не исключена возможность использования его для производства глинозема.

Методика исследований

Основой для написания статьи являются результаты 10 проб угля из двух месторождений Майкубеньского бассейна — Талдыколь и Сарыколь. Пробы изучались методом инструментально-

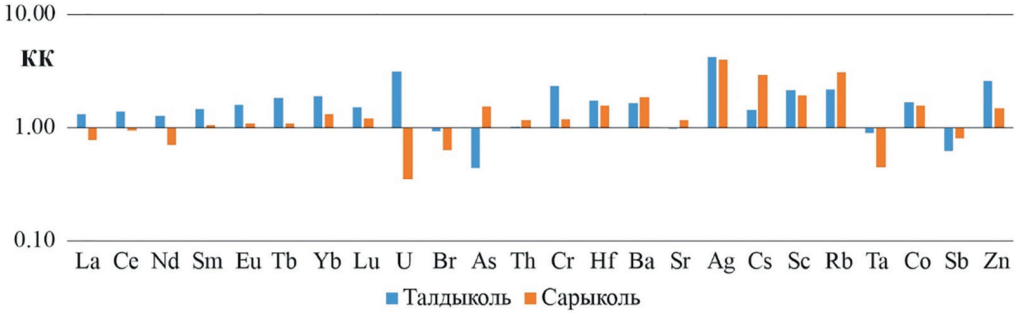


Рис. 3. Распределение кларк-концентраций элементов
Fig. 3. Distribution of Clark concentrations of elements

го нейтронно-активационного анализа (ИНАА) на определение средних содержаний 28 элементов Sm, Ce, Ca, Lu, U, Th, Cr, Yb, Au, Hf, Ba, Sr, Nd, As, Br, Cs, Ag, Tb, Sc, Rb, Fe, Zn, Ta, Co, Na, Eu, La, Sb в ядерно-геохимической лаборатории кафедры геоэкологии и геохимии Национального исследовательского Томского политехнического университета. Опробование угольных пластов выполнялось бороздовым методом с дифференцированным отбором проб на изучаемых месторождениях.

Результаты исследований и их обсуждение

В пределах Майкубеньского бассейна были изучены угли месторождений Сарыколь и Талдыколь. Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что угли бассейна характеризуются единообразием в геохимическом спектре элементов, за исключением некоторых из них. В пределах Майкубеньского бассейна изученные объекты обогащены критическими элементами (Sc, Cs, U), рядом цветных металлов (Zn, Co,

Таблица 1

Среднее содержание элементов-примесей месторождений Талдыколь и Сарыколь Майкубеньского бассейна (г/т)
Average content of trace elements of Taldykol and Sarykol deposits of the Maikuben basin (g/t)

Элемент	Талды-коль	Сары-коль	Кларки для бурых углей [5]	Элемент	Талды-коль	Сары-коль	Кларки для бурых углей [5]
La,	13,1	7,7	10	Cr	34,9	17,7	15
Ce	30,7	21,0	22	Hf	2,1	1,9	1,2
Nd	13,9	7,7	11	Ba	248,0	278,5	150
Sm	2,8	2,0	1,9	Sr	119,3	139,9	120
Eu	0,8	0,5	0,5	Ag	0,4	0,4	0,09
Tb	0,6	0,3	0,32	Cs	1,4	2,9	0,98
Yb	1,9	1,3	1,00	Sc	8,7	7,9	4,1
Lu	0,3	0,2	0,19	Rb	21,6	30,9	10
U	9,0	1,0	2,9	Ta	0,2	0,1	0,26
Br	4,1	2,8	4,4	Co	7,1	6,6	4,2
As	3,4	11,7	7,6	Sb	0,5	0,7	0,84
Th	3,3	3,9	3,3	Zn	46,4	27,0	18

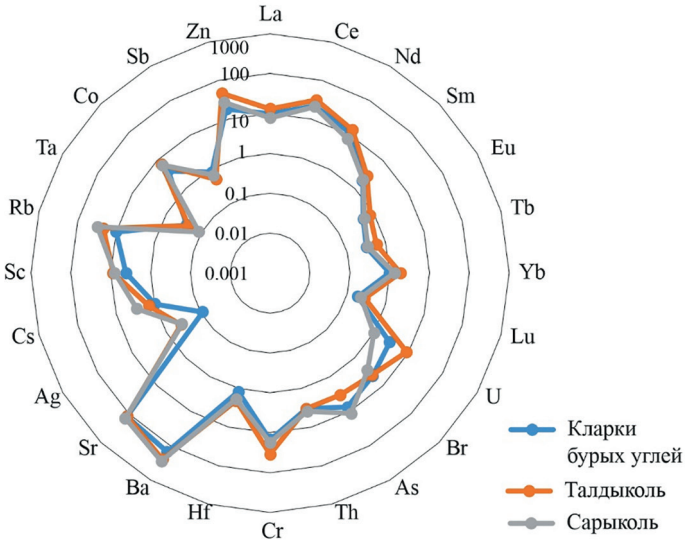


Рис. 4. Сравнение среднего содержания элементов-примесей и РЗЭ в углях бассейна Майкубень с кларками для бурых углей [4]

Fig. 4. Comparison of the average content of trace elements and rare earth elements (REE) in the coals of the Maikuben Basin with Clark values for brown coals [4]

Ba), а также благородных (Ag) (рис. 3, табл. 1). Предположительно, формирование объекта происходило под влиянием недифференцированного терригенного сноса с обрамления бассейна, сложенного гранитоидами (см. рис. 3).

Распределение среднего содержания элементов-примесей и РЗЭ в юрских углях бассейна Майкубень, представленное на рис. 4, показывает, что большинство элементов-примесей в углях имеют содержание околокларковых значений [4]. Содержание РЗЭ (рис. 5) колеблется от 31,8 до 104,3 г/т со средним значением 52,4 г/т в юрских углях бассейна Майкубень; немного выше, чем среднее значение РЗЭ мировых углей (46,9 г/т) [4], и в 2 раза меньше, чем значение РЗЭ верхней континентальной коры (ВКК) (129,6 г/т) [19].

Установленная высокая контрастность аномалий элементов-примесей позволяет прогнозировать выделение угольных пластов со значимыми содержаниями Zn, As, Ag и U, а также Ce, Ba, Yb, Sr.

Также хотелось бы отметить, что содержание в углях токсичных и потенциально токсичных элементов не превышает «порог токсичности» для углей, но следует обратить внимание на повышенное содержание урана, уровни накопления которого в некоторых пробах месторождения Талдыколь, по расчетным данным, составляют 127 г/т золы, что выше кларкового содержания этого элемента в несколько раз. В связи с этим рекомендуется создать эффективную систему контроля качества угля по радиационно-гигиеническому фактору, во избежание загрязнения территории радиоактивными элементами.

Анализ латерального распределения лантаноидов в углях (см. рис. 5) показал, что сумма РЗЭ увеличивается с запада к востоку бассейна Майкубень.

В данной ситуации, учитывая выраженные колебания содержания РЗЭ по разным точкам, наиболее вероятна комбинация гидротермального влияния и терригенного поступления как основ-

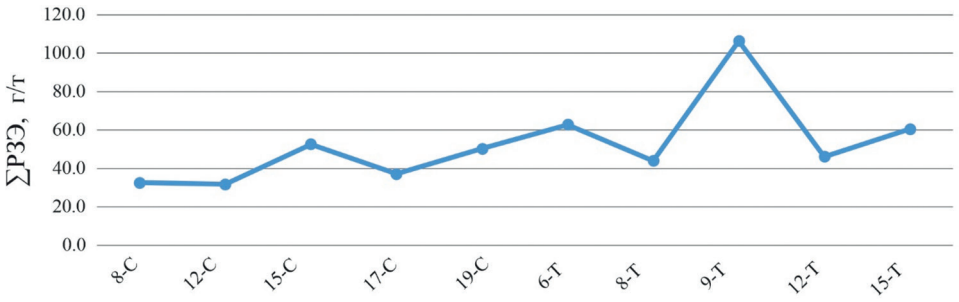


Рис. 5. Латеральное распределение РЗЭ в юрском угле бассейна Майкубень
Fig. 5. Lateral distribution of REEs in Jurassic coal of the Maikuben Basin

ных факторов формирования содержания редкоземельных элементов в углях бассейна. В результате изучения геологической истории развития района Майкубеньского бассейна (рис. 6) можно предположить, что основная область сноса осадков была расположена к западу, югу и востоку от площади, занимаемой в настоящее время Майкубеньским бассейном.

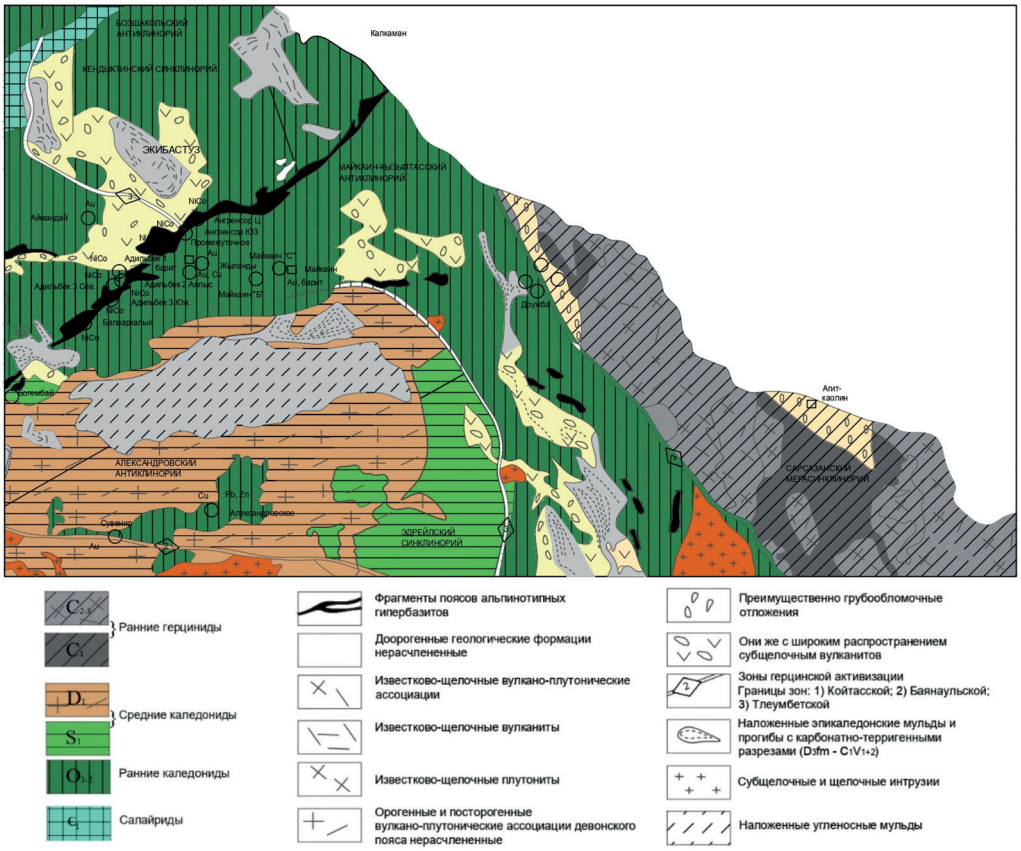


Рис. 6. Схема основных структур листа М-43-Б
Fig. 6. Diagram of the main structures of sheet M-43-B

Геохимический облик структур обрамления весьма разнообразен. В южной и юго-восточной части интрузивные породы различного состава: плагиогранодиориты, K-Na- сиеногранитыи, Na-граносиениты, лейкогранитовый и щелочной аляскиты. Геохимической особенностью щелочно-гранитоидных пород является их контрастная обогащенность литофильными и рядом других элементов, которые в дальнейшем могли мигрировать в угольный пласт с грунтовыми и поверхностными водами.

Вулканические комплексы (Александровский антиклинорий) (см. рис. 6), расположенные по юго-западной и западной границах угленосного бассейна, представлены большим количеством субщелочных пород – трахибазальтов, трахиандезитов и трахидацитов с высоким содержанием калия. В полях развития вулканогенных пород широко проявлены мелкие, а иногда и средние месторождения, разрушение которых могло привести к накоплению многих химических элементов в бассейне угленакопления. В качестве источников редкоземельных элементов могли выступать Баянаульская и Тлеумбетская зоны тектоно-магматической активизации, также повлиявшие на металлогенический и геохимический облик региона.

Оценена степень обогащения элементами-примесями юрских углей бассейна Майкубень по сравнению с кларковыми значениями для бурых углей. Содержание элементов-примесей в углях месторождения Сарыколь в основном ниже соответствующих кларков для бурых углей (Юдович, Кетрис, 2006). Незначительные превышения (0,5<KK<<2) над кларком установлены для литофильных элементов: REE Cr, Br, Th, Hf, Ba, Sr, Sc; Co (сидерофильный); Sb, Zn, As (халькофильные). Обогащены (2<KK<<5) литофильными элементами Cs, Rb, и халькофильным элементом Ag. При этом полученные концентрации не имеют практического значения.

Для углей месторождения Талдыколь характерно накопление редкоземельных элементов иттриевой группы и Yb,

Таблица 2

Геохимические параметры редкоземельных элементов в образцах угля
Geochemical parameters of rare earth elements in coal samples

Образец	Тип распределения	La_n / Yb_n	δEu	δCe	La_n / Sm_n	La_n / Lu_n	∑РЗЭ
6-Т	Н	0,37	1,56	0,96	0,90	0,57	62,84
8-Т	Н	0,53	1,16	1,08	0,79	0,45	44,02
9-Т	Н	0,67	1,28	1,00	0,78	0,56	106,34
12-Т	Н	0,49	1,08	1,15	0,50	0,42	46,15
15-Т	Н	0,46	1,16	1,02	0,62	0,41	60,51
8-С	Н	0,77	1,20	1,08	0,60	0,64	32,60
12-С	Н	0,45	1,30	1,16	0,49	0,40	31,84
15-С	Н	0,40	1,09	1,56	0,49	0,34	52,56
17-С	Н	0,33	1,48	1,11	0,53	0,27	37,23
19-С	Н	0,41	1,34	1,10	0,81	0,33	50,33

Примечание. Чередование: $\sum REY = La + Ce + Nd + Sm + Eu + Tb + Yb + Lu$;
$\delta Eu = Eu_N / Eu_N^* = Eu_N / [(Sm_N \times 0,67) + (Tb_N \times 0,33)]$; $\delta Ce = Ce_N / Ce_N^* = Ce_N / [(La_N \times 0,67 + Nd_N \times 0,33)]$;
Sm_N, Eu_N, Gd_N, Tb_N, La_N, Lu_N, Ce_N, Nd_N — нормированное соотношение редкоземельных элементов в верхней континентальной коре [19].

заметно обогащение некоторых элементов. Незначительные превышения над кларком (0,5 < КК < 2) установлены для литофильных элементов: REE, Br, Th, Hf, Ba, Sr, Cs, Ta; сидерофильного элемента Co и для халькофильного элемента Sb. Обогащены (2 < КК < 5) литофильными элементами U, Rb, Cr, Sc и халькофильными элементами Ag, Zn.

По сравнению с концентрацией РЗЭ в ВКК (верхняя часть континентальной коры) [6] выделяются три типа обогащения: L-тип ($La_N / Lu_N > 1$), M-тип ($La_N / Sm_N < 1$,) и H-тип ($La_N / Lu_N < 1$). Соотношение La_N / Lu_N угля колеблется от 0,27 до 0,64 (см. табл. 1), что указывает на характерное преобладание тяжелых лантаноидов над легкими в углях (H-тип).

По особенностям нормированных по хондриту кривых распределения РЗЭ в Майкубеньском бассейне (рис. 7, табл. 2)

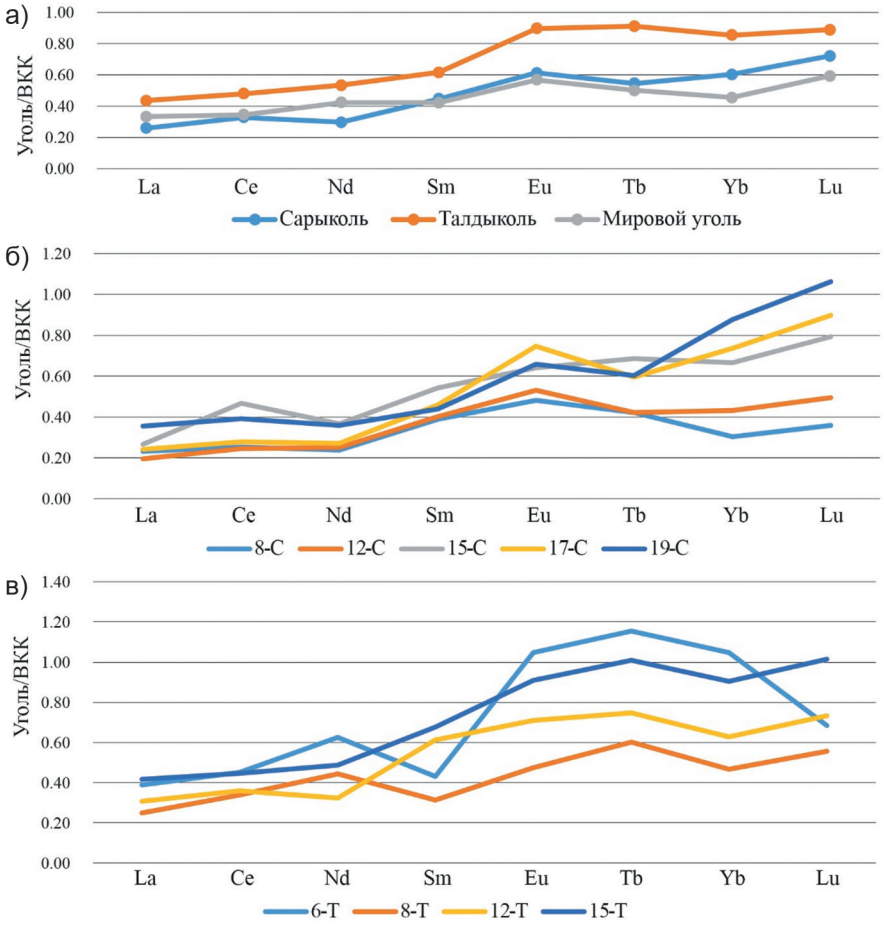


Рис. 7. Модели распределения РЗЭ в углях в бассейне Майкубень: модели распределения среднего значения РЗЭ в мировом угле, юрском угле разрезов Сарыколь и Талдыколь (а); модели распределения РЗЭ в углях разреза Сарыколь (8-С, 12-С,15-С, 17-С, 19-С — номера образцов) (б); модели распределения РЗЭ в углях разреза Талдыколь (6-Т, 8-Т, 12-Т, 15-Т — номера образцов) (в)

Fig. 7. Models of REE distribution in coal in the Maikuben Basin: models of the distribution of the average REE content in world coal, Jurassic coal from the Sarykol and Taldykol sections (a); models of the distribution of REE in coal from the Sarykol section (b); models of the distribution of REE in coal from the Taldykol section (v)

можно отметить три особенности: а) присутствие положительных Ce-, Eu-аномалий; б) отсутствие Eu-минимума; в) распределение РЗЭ в юрском угле бассейна Майкубень в основном проявляется как распределение Н-типа с положительной аномалией Lu; предполагается, что флюид перенес ионы РЗЭ в угленосный бассейн, а тяжелые РЗЭ собираются в угле из-за различных химических свойств каждого РЗЭ. Также положительные Eu-аномалии (Eu/Eu* = = 1,08 — 1,56) свидетельствуют о гидрогенном механизме накопления лантаноидов.

Обогащение торфяника редкими землями могло произойти при инфильтрации кислых природных вод в эпигенетический период, о чем свидетельствует положительная аномалия церия.

Широкие вариации корреляционных зависимостей с зольностью указывают на наличие различных форм нахождения РЗЭ в углях и их различный вклад. Увеличение содержания РЗЭ в угле при постоянстве содержания в золе с ростом зольности указывает на преимущественную связь концентраций с минеральной частью. Уменьшение содержания элемента с ростом зольности в угле и золе указывает на связь с органической частью.

В работе С.И. Арбузова и др. [20], в которой опубликованы данные по формам нахождения РЗЭ в углях, утверждалось, что на буроугольной стадии углефикации основными носителями РЗЭ являются гуминовые вещества. Минеральные компоненты играют второстепенную роль в накоплении РЗЭ. Проведенное исследование [20] показывает, что в обоих месторождениях (Талдыколь и Сарыколь) преобладающее содержание РЗЭ (75 — 81%) приходится на нерастворимую фракцию, что указывает на их преимущественно минеральную форму нахождения. Это, возможно, говорит о том, что на более поздних этапах углефикации РЗЭ в основном связываются с глинистыми минералами.

Корреляционная зависимость между содержанием редкоземельных элементов (РЗЭ) в угле и зольностью (в выборке при n = 10) представлена на рис. 8, *а*. Коэффициент корреляции (r) составляет 0,66. В золах (рис 8, *б*) наблюдается отрицательная корреляционная зависимость между содержанием редкоземельных элементов (РЗЭ) и зольностью, с коэффициентом корреляции r = -0,77.

В целом, содержание РЗЭ в углях увеличивается с ростом зольности (см. рис. 9, *а*), тогда как в золах содержание РЗЭ снижается по мере увеличения

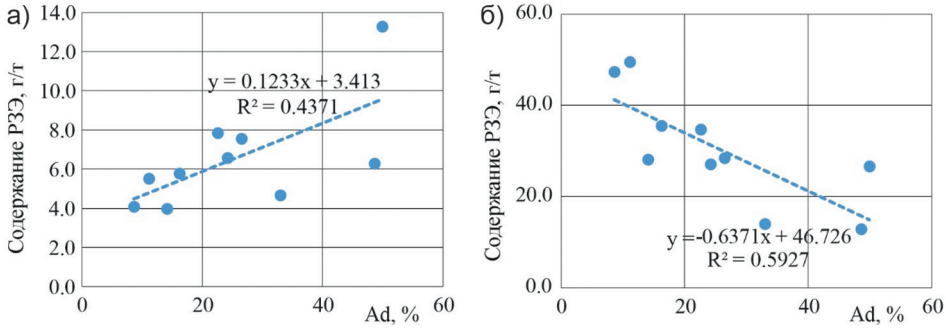


Рис. 8. Зависимость содержания РЗЭ: в угле от зольности (r = 0,66 выборка при n = 10) (а); в золе углей от зольности (r = –0,77, n = 10) (б)

Fig. 8. Dependence of REE content: in coal on ash content (r = 0.66, sample size n = 10) (a); in coal ash on ash content (r = –0.8, n = 10) (b)

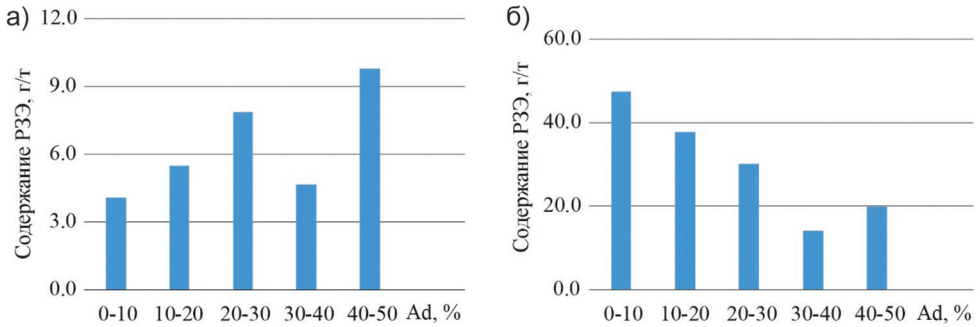


Рис. 9. Средние содержания РЗЭ: в углях по группам зольности (а); в золе углей по группам зольности (б)
Fig. 9. Average REE content: in coals by ash content groups (a); in coal ash by ash content groups (b)

зольности (рис. 9, *б*), и это может означать следующее: увеличение содержания РЗЭ в углях с ростом зольности связано с тем, что РЗЭ часто ассоциированы с минеральными компонентами угля, количество которых увеличивается по мере роста зольности. Также уменьшение содержания элемента с ростом зольности в золе указывает на связь с органической частью. В углях с более высокой зольностью больше минеральных веществ, содержащих РЗЭ. Также возможна связь РЗЭ с органической частью угля, которая сгорает, оставляя меньшее количество этих элементов в остаточной золе. Судя по приведенным данным, вклад органической части немного выше, чем минеральной, но в целом они сопоставимы.

При формировании углей типа Н с околокларковыми содержаниями РЗЭ основным носителем этих элементов было глинистое вещество терригенной золы. В.В. Середин [21] предполагает, что это происходило вследствие длительной разгрузки углекислых вод с повышенным содержанием тяжелых РЗЭ в торфяник, где РЗЭ затем связывались с органическим веществом торфа. В работе [22] также можно отметить, что более тяжелые РЗЭ склонны к взаимодействию с органическим веществом на торфяной стадии древнего торфонакопления, в отличие от более легких РЗЭ. Эти результаты согласуются с выводами обобщающей работы С.И. Арбузова и др. [20], где представлены данные о формах присутствия РЗЭ в углях и утверждается, что на стадии бурого угля преобладает их органическая форма.

Заключение

Анализ распределения элементов-примесей, в том числе РЗЭ, в углях бассейна Майкубень показал, что большинство элементов-примесей в углях имеют содержание, не превышающее их кларки в углях.

Установлено также, что содержание РЗЭ немного выше, чем среднее значение РЗЭ мировых углей, и в 2 раза меньше, чем значение РЗЭ верхней континентальной коры.

Данное исследование позволило выявить ряд геохимических особенностей юрских углей Майкубеньского бассейна: присутствие трех типов обогащения редкоземельных элементов — L-тип ($La_N / Lu_N > 1$), M-тип ($La_N / Sm_N < 1$,) и H-тип ($La_N / Lu_N < 1$), соотношение La_N / Lu_N угля колеблется от 0,27 до 0,64, что указывает на характерное преобладание тяжелых лантаноидов над легкими в углях (H тип); по хондриту кривых распределения РЗЭ отмечается присутствие положительных Ce-, Eu-аномалий; отсутствие Eu-минимума; распределение H-типа с положитель-

ной аномалией Lu; положительные Eu-аномалии ($Eu/Eu^* = 1{,}08 — 1{,}56$).

Определено, что содержание РЗЭ в углях увеличивается с ростом зольности, в золах содержание РЗЭ снижается по мере увеличения зольности, также установлены корреляционные связи между содержанием РЗЭ в угле и зольностью ($r = 0{,}6$), в золах между содержанием РЗЭ и зольностью присутствует отрицательная зависимость с $r = -0{,}8$.

Установлено, что привнос элементов-примесей в угли изучаемого бассейна происходил из пород области сноса. В южной и юго-восточной частях границ Майкубеньского угольного бассейна участвуют интрузивные породы различного состава: плагиогранодиориты, K-Na-сиенограниты, Na-граносиениты, лейкогранитовый и щелочной аляскиты. Вулканические комплексы по юго-западной и западной границам угленосного бассейна представлены большим количеством субщелочных пород – трахибазальтов, трахиандезитов и трахидацитов с высоким содержанием калия. В полях развития вулканогенных пород широко проявлены мелкие месторождения, а иногда и средние месторождения, разрушение которых привело к накоплению химических элементов в бассейн угленакопления.

Комплексное освоение месторождений — это система технических, экономических и других методов и средств, обеспечивающих комплексную разведку и оценку месторождений, добычу минерального сырья и его переработку для достижения оптимального уровня извлечения из добытого сырья основных и попутных компонентов и утилизацию отходов производства. Растущая потребность мировой экономики в большинстве редких, цветных и радиоактивных руд, их исчерпаемость и выявленные повышенные концентрации этих металлов в углях обусловили необходимость комплексного освоения угольных месторождений.

Тем не менее, добыча и потребление углей не всегда экологически безопасны. Так, например, сжигание обогащенных ураном углей месторождения Талдыколь может привести к накоплению в отвалах радиоактивных отходов. Повышенные концентрации ртути в некоторых пробах Карагандинского бассейна также являются серьезной экологической проблемой. Эти данные необходимо учитывать при освоении месторождений и разработке природоохранных мероприятий. Необходима организация мониторинга качества товарных углей с учетом их возможного ртутного загрязнения. Некоторые из них являются токсичными — ртуть, мышьяк, сурьма, бериллий и другие. Всестороннее использование углей и сопутствующих им полезных ископаемых повышает рентабельность разработки угольных месторождений и способствует решению ряда экологических проблем.

Таким образом, полученные нами данные, наряду с информацией, накопленной в ходе геохимического изучения объектов за последние годы, позволяет считать угольные месторождения Майкубень перспективными для комплексного освоения с извлечением группы элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Юдович Я. Э.*, *Кетрис М. П.* Ценные элементы-примеси в углях. — Екатеринбург: УрО РАН, 2006. — 538 с.

2. *Арбузов С. И.*, *Ершов В. В.* Геохимия редких элементов в углях Сибири. — Томск: Издат. дом «Д_Принт», 2007. — 468 с.

3. *Dai S., Ren D.* Effects of magmatic intrusion on mineralogy and geochemistry of coals from the Fengfeng — Handan Coalfield, Hebei, China // Energy & Fuels. 2007, vol. 21, pp. 1663 — 1673. DOI: 10.1021/ef060618f.

4. *Ketris M. P. Yudovich Ya. E.* Estimations of clarkes for carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals // International Journal of Coal Geology. 2009, vol. 78, pp. 135 — 148. DOI: 10.1016/j.coal.2009.01.002.

5. *Dai S., Ren D., Chou C. L., Finkelman R. B., Seredin V. V., Zhou Y.* Geochemistry of trace elements in Chinese coals: a review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization // International Journal of Coal Geology. 2012, vol. 94, pp. 3 — 21. DOI: 10.1016/j.coal.2011.02.003.

6. *Арбузов С. И., Ильенок С. С., Машенькин В. С., Сунь Ю., Жао Ц., Блохин М. Г., Зарубина Н. В.* Редкоземельные элементы в позднепалеозойских углях Северной Азии (Сибирь, Северный Китай, Монголия, Казахстан) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2016. — Т. 327. — № 8. — С. 74 — 88.

7. *Dai S., Finkelman R. B., French D., Hower J. C., Graham I. T., Zhao F.* Modes of occurrence of elements in coal: A critical evaluation // Earth-Science Reviews. 2021, vol. 222, article 103815. DOI: 10.1016/j.earscirev.2021.103815.

8. *Kopobayeva A. N., Baydauletova I. V., Amangeldikyzy A., Blyalova G., Askarova N. S.* Trace elements distribution in the k7 seam of the Karaganda coal basin, Kazakhstan // Geosciences. 2024, vol. 14, article 143. DOI: 10.3390/geosciences14060143.

9. *Kopobayeva A. N., Amangeldikyzy A., Blyalova G. G., Askarova N. S.* Features of rare earth elements geochemistry in coals of Central Kazakhstan // Acta Geochimica. 2024, vol. 43, no. 1, pp. 5 — 19. DOI: 10.1007/s11631-024-00677-3.

10. *Amangeldykyzy A., Kopobayeva A. N., Bakyt A., Ozhigin D. S., Blyalova G. G.* Mineralogy and geochemistry of the Shubarkol deposit Jurassic coals // News of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. 2021, vol. 449, pp. 23 — 31. DOI: 10.32014/2021.2518-170X.94.

11. *Ильенок С. С.* Геохимия элементов-примесей в углях Азейского месторождения Иркутского угольного бассейна: дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.09. — Томск, 2017. — 207 с.

12. *Dai S., Ji D., Ward C. R., French D., Hower J. C., Yan X., Wei Q.* Mississippian anthracites in Guangxi Province, Southern China: Petrological, mineralogical, and rare earth element evidence for high-temperature solutions // International Journal of Coal Geology. 2018, vol. 197, pp. 84 — 114. DOI: 10.1007/s11053-025-10477-y.

13. *Finkelman R. B., Bostick N. H., Dulong F. T., Senftle F. E., Thorpe A. N.* Influence of an igneous intrusion on the inorganic geochemistry of a bituminous coal from Pitkin County, Colorado // International Journal of Coal Geology. 1998, vol. 36, pp. 223 — 241.

14. *Ибрагимова Д. А., Арбузов С. И., Портнов В. С.* Металлоносные угли месторождения Шубарколь (Центральный Казахстан) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2023. — Т. 334. — № 3. — С. 26 — 39.

15. *Цеховский Ю. Г., Балуев А. С., Стукалова И. Е., Корнева Р. Г.* Седиментогенез в мезозойских и кайнозойских рифтовых впадинах Центральной Азии // Труды Геологического института. — 2018. — № 617. — С. 1 — 168.

16. *Чамов Н. П.* Вопросы связи литологии и тектоники при изучении осадочных бассейнов // Литология и полезные ископаемые. — 2008. — № 4. — С. 377 — 395.

17. *Тараканов А. С.* Геодинамический анализ угленосных формаций: автореф. дисс. ... докт. геолого-минералогических наук: специальность 04.00.16. — Санкт-Петербург, 1992. — 46 с.

18. *Геология* месторождений угля и горючих сланцев СССР / Угольные бассейны и месторождения Казахстана. Т. 5. — М.: Недра, 1973. — 720 с.

19. *Taylor S. R., McLennan S. M.* The continental crust: Its composition and evolution. Blackwell, Oxford, Geological Magazine. 1985, pp. 673 — 674. DOI: 10.1002/gj.3350210116.

20. *Арбузов С. И., Финкельман Р. Б., Ильенок С. С., Маслов С. Г., Межибор А. М., Блохин М. Г.* Формы нахождения редкоземельных элементов (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) в углях Северной Азии (обзор) // Химия твердого топлива. — 2019. — № 1. — С. 3 — 25.

21. *Середин В. В.* Основные закономерности распределения редкоземельных элементов в углях // Доклады Академии наук. — 2001. — Т. 377. — № 2. — С. 239 — 243.

22. *Вялов В. И., Наставкин А. В., Шишов Е. П.,* & *Чернышев А. А.* Особенности распределения редкоземельных элементов в углях Дальнего Востока России // Георесурсы. — 2024. — № 26(2). — С. 34 — 52. ГИАБ

REFERENCES

1. Yudovich Ya. E., Ketris M. P. *Tsennye elementy-primesi v uglyakh* [Valuable impurity elements in coals], Ekaterinburg, UrO RAN, 2006, 538 p.

2. Arbuzov S. I., Ershov V. V. *Geokhimiya redkikh elementov v uglyakh Sibiri* [Geochemistry of rare elements in coals of Siberia], Tomsk, 2007, 468 p.

3. Dai S., Ren D. Effects of magmatic intrusion on mineralogy and geochemistry of coals from the Fengfeng — Handan Coalfield, Hebei, China. *Energy & Fuels*. 2007, vol. 21, pp. 1663 — 1673. DOI: 10.1021/ef060618f.

4. Ketris M. P. Yudovich Ya. E. Estimations of clarkes for carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*. 2009, vol. 78, pp. 135 — 148. DOI: 10.1016/j.coal.2009.01.002.

5. Dai S., Ren D., Chou C. L., Finkelman R. B., Seredin V. V., Zhou Y. Geochemistry of trace elements in Chinese coals: a review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization. *International Journal of Coal Geology*. 2012, vol. 94, pp. 3 — 21. DOI: 10.1016/j.coal.2011.02.003.

6. Arbuzov S. I., Ilyenok S. S., Mashenkhin V. S., Sun Y., Zhao C., Blokhin M. G., Zarubina N. V. Rare earth elements in the Late Paleozoic coals of Northern Asia (Siberia, Northern China, Mongolia, Kazakhstan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2016, vol. 327, no. 8, pp. 74 — 88. [In Russ].

7. Dai S., Finkelman R. B., French D., Hower J. C., Graham I. T., Zhao F. Modes of occurrence of elements in coal: A critical evaluation. *Earth-Science Reviews*. 2021, vol. 222, article 103815. DOI: 10.1016/j.earscirev.2021.103815.

8. Kopobayeva A. N., Baydauletova I. V., Amangeldikyzy A., Blyalova G., Askarova N. S. Trace elements distribution in the k7 seam of the Karaganda coal basin, Kazakhstan. *Geosciences*. 2024, vol. 14, article 143. DOI: 10.3390/geosciences14060143.

9. Kopobayeva A. N., Amangeldikyzy A., Blyalova G. G., Askarova N. S. Features of rare earth elements geochemistry in coals of Central Kazakhstan. *Acta Geochimica*. 2024, vol. 43, no. 1, pp. 5 — 19. DOI: 10.1007/s11631-024-00677-3.

10. Amangeldykyzy A., Kopobayeva A. N., Bakyt A., Ozhigin D. S., Blyalova G. G. Mineralogy and geochemistry of the Shubarkol deposit Jurassic coals. *News of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*. 2021, vol. 449, pp. 23 — 31. DOI: 10.32014/2021.2518-170X.94.

11. Il'enok S. S. *Geokhimiya elementov-primesey v uglyakh Azeyskogo mestorozhdeniya Irkutskogo ugol'nogo basseyna* [Geochemistry of impurity elements in the coals of the Azeyskoye deposit of the Irkutsk coal basin], Candidate's thesis, Tomsk, 2017, 207 p.

12. Dai S., Ji D., Ward C. R., French D., Hower J. C., Yan X., Wei Q. Mississippian anthracites in Guangxi Province, Southern China: Petrological, mineralogical, and rare earth element evidence for high-temperature solutions. *International Journal of Coal Geology*. 2018, vol. 197, pp. 84 — 114. DOI: 10.1007/s11053-025-10477-y.

13. Finkelman R. B., Bostick N. H., Dulong F. T., Senftle F. E., Thorpe A. N. Influence of an igneous intrusion on the inorganic geochemistry of a bituminous coal from Pitkin County, Colorado. *International Journal of Coal Geology*. 1998, vol. 36, pp. 223 — 241.

14. Ibragimova D. A., Arbuzov S. I., Portnov V. S. Metalliferous coals of the Shubarkol deposit (Central Kazakhstan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2023, vol. 334, no. 3, pp. 26 — 39. [In Russ].

15. Tsekhovsky Yu. G., Baluev A. S., Stukalova I. E., Korneva R. G. Sedimentogenesis in Mesozoic and Cenozoic rift basins of Central Asia. *Trudy Geologicheskogo instituta*. 2018, no. 617, pp. 1 — 168. [In Russ].

16. Chamov N. P. The relationship between lithology and tectonics in the study of sedimentary basins. *Lithology and Mineral Resources*. 2008, no. 4, pp. 377 — 395. [In Russ].

17. Tarakanov A. S. *Geodinamicheskiy analiz uglenosnykh formatsiy* [Geodynamic analysis of coal-bearing formations], Doctor's thesis, Saint-Petersburg, 1992, 46 p.

18. Geology of coal and oil shale deposits of the USSR. *Ugol'nye basseyny i mestorozhdeniya Kazakhstana* [Coal basins and deposits of Kazakhstan], vol. 5, Moscow, Nedra, 1973, 720 p.

19. Taylor S. R., McLennan S. M. *The continental crust: Its composition and evolution*. Blackwell, Oxford, Geological Magazine. 1985, pp. 673 — 674. DOI: 10.1002/gj.3350210116.

20. Arbuzov S. I., Finkelman R. B., Ilyenok S. S., Maslov S. G., Mezhibor A. M., Blokhin M. G. Forms of occurrence of rare earth elements (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) in coals of Northern Asia (Review). *Solid Fuel Chemistry*. 2019, no. 1, pp. 3—25. [In Russ].

21. Seredin V. V. General *Patterns of rare earth element distribution in coals. Doklady Akademii nauk*. 2001, vol. 377, no. 2, pp. 239—243. [In Russ].

22. Vyálov V. I., Nastavkin A. V., Shishov E. P., Chernyshev A. A. Features of rare earth element distribution in coals of the Russian Far East. *Georesources*. 2024, no. 26(2), pp. 34—52. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Копобаева Айман Ныгметовна[1] — PhD, доцент,
e-mail: a.kopobayeva@kstu.kz,
ORCID ID: 0000-0002-0601-9365,
Блялова Гулим Галымжановна[1] — магистр техн. наук,
e-mail: gulim.blyalova@kstu.kz,
ORCID ID: 0000-0001-8801-8683,
Амангельдыкызы Алтынай[1] — PhD, и.о. доцента,
e-mail: a.amangeldykyzy@kstu.kz,
ORCID ID: 0000-0002-6665-8804,
Сунгатуллин Рафаэль Харисович — д-р геол.-минерал. наук,
профессор, Казанский федеральный университет,
Институт геологии и нефтегазовых технологий,
e-mail: Rafael.Sungatullin@kpfu.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7275-1549,
Оразбек Нурдаулет Ерубайулы[1] — магистрант,
e-mail: nurda94@mail.ru,
[1] Карагандинский технический университет
имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан.
Для контактов: Амангельдыкызы А., e-mail: a.amangeldykyzy@ktu.edu.kz.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.N. Kopobaeva[1], PhD, Associate Professor,
e-mail: a.kopobayeva@kstu.kz,
ORCID ID: 0000-0002-0601-9365,
G.G. Blyalova[1], Master of Technical Sciences,
e-mail: gulim.blyalova@kstu.kz,
ORCID ID: 0000-0001-8801-8683,
A. Amangeldikyzy[1], PhD, Acting Associate Professor,
e-mail: a.amangeldykyzy@kstu.kz,
ORCID ID: 0000-0002-6665-8804,
R.Kh. Sungatullin, Dr. Sci. (Geol. Mineral.), Professor,
Kazan (Volga Region) Federal University,
Institute of Geology and Unconventional Technologies,
420102, Kazan, Russia, e-mail: Rafael.Sungatullin@kpfu.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7275-1549,
N. Orazbek[1], Master's Student, e-mail: nurda94@mail.ru,
[1] Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
100000, Karaganda, Kazakhstan.
Corresponding author: A. Amangeldikyzy, e-mail: a.amangeldykyzy@ktu.edu.kz.

Получена редакцией 23.01.2025; получена после рецензии 18.05.2025; принята к печати 10.08.2025.
Received by the editors 23.01.2025; received after the review 18.05.2025; accepted for printing 10.08.2025.