

# Уголь – сырье для наукоемких отраслей промышленности\*

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-S12-67-71>

При работе предприятий теплоэнергетики образуется огромное количество золошлаковых отходов, которые загрязняют окружающую среду и утилизируются только на 10%. Необходимо рассматривать уголь как комплексное сырье. Золошлаки Кузбасса могут использоваться для извлечения дорогостоящих редких и редкоземельных элементов (РЗЭ), что существенно повышает рентабельность угольной отрасли за счет получения как металлов, так и функциональных материалов на их основе. В работе были исследованы золошлаковые отходы ГРЭС и ТЭЦ Кузбасса методами оптико-эмиссионной спектрометрии и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Полученные данные свидетельствуют о том, что золошлаки Кузнецких углей содержат промышленно значимые кондиции многих редких и редкоземельных металлов, или их содержание близко к промышленно значимому.

**Ключевые слова:** уголь, угольные отходы, редкие, рассеянные и редкоземельные элементы, золошлаковые материалы.

**Для цитирования:** Уголь – сырье для наукоемких отраслей промышленности / Т.Г. Черкасова, А.В. Тихомирова, Е.В. Черкасова и др. // Уголь. 2022. № S12. С. 67-71. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-S12-67-71>.

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день уголь остается одним из самых используемых природных ресурсов мира. В России в 2021 г. было добыто 432 млн т этого ископаемого топлива, из которых 241,2 млн т приходится на Кузнецкий угольный бассейн [1]. Выделяют следующие виды отходов добычи и обогащения каменного угля (нормативы их образования): вскрышные породы, образующиеся при открытых способах добычи (36-40 тыс. куб. м / т угля); вмещающие породы, образующиеся при шахтной добыче (110-150 куб. м / т угля); отходы углеобогатительных фабрик (100-120 куб. м / т угля). Эти отходы представляют

## ЧЕРКАСОВА Т.Г.

Доктор хим. наук, профессор,  
директор ИХНТ ФГБОУ ВО «КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева»,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: [ctg.htnv@kuzstu.ru](mailto:ctg.htnv@kuzstu.ru)

## ТИХОМИРОВА А.В.

Канд. хим. наук, доцент  
ИХНТ ФГБОУ ВО «КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева»,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: [tav.htnv@kuzstu.ru](mailto:tav.htnv@kuzstu.ru)

## ЧЕРКАСОВА Е.В.

Канд. хим. наук, доцент  
ИХНТ ФГБОУ ВО «КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева»,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: [chev.htnv@kuzstu.ru](mailto:chev.htnv@kuzstu.ru)

## НЕВЕДРОВ А.В.

Канд. техн. наук, доцент  
ИХНТ ФГБОУ ВО «КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева»,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: [nevedrov@kuzstu.ru](mailto:nevedrov@kuzstu.ru)

## ПАПИН А.В.

Канд. техн. наук, доцент  
ИХНТ ФГБОУ ВО «КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева»,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: [pav.httt@kuzstu.ru](mailto:pav.httt@kuzstu.ru)

\* Исследование выполнено за счет гранта Минобрнауки Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2022-1194).

собой в основном горючий материал, например, угольную крошку, пыль, водоугольную взвесь. Кроме этого, в процессе добычи и обогащения угля могут образовываться природный камень, гравий, песок, глинистые породы, в том числе горелые глинистые породы.

Среди направлений возможного использования отходов добычи и обогащения каменного угля можно выделить черную и цветную металлургию, строительную, химическую, газовую, нефтедобывающую промышленности и сельское хозяйство. Однако не стоит забывать и про отходы углепотребления, так называемые золошлаки, представляющие собой не что иное, как минеральную часть, оставшуюся после сгорания углей.

На сегодняшний день только около 1% от общего объема золошлаковых отходов перерабатываются в строительные материалы, что является практически единственным способом их утилизации. В основном же предприятия занимаются их складированием. Тем не менее, согласно исследованиям ряда ученых [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13], такие виды отходов содержат ряд редких и редкоземельных элементов, кондиции которых позволяют рассматривать их как сырье для выделения концентратов ценных компонентов.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Целью работы является исследование угля, а также отходов, образующихся в ходе его обогащения, потребления и переработки, на предмет пригодности в качестве сырья для получения соединений элементов, используемых в наукоемких отраслях промышленности.

Ранние исследования содержания редких и РЗЭ посвящены геологическим или геохимическим характеристикам их размещения и проводились в основном не на отходах переработки, а на самих углях следующим образом: исследование угольного месторождения; исследование углей по пластам месторождения; озоление отдельных образцов угля и определение содержания редких и РЗЭ в золе.

В углях выявлен геохимически связанный комплекс элементов, включающий Li, Be, Mg, Al, Sc, Ti, Fe, Ga, Ge, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ag, платиновые металлы, редкоземельные элементы (РЗЭ), Hf, Ta, Au, Bi, Th, U – всего 41 компонент, в том числе 6 платиновых металлов – Ru, Rh, Pd, Re, Ir, Pt; 13 лантаноидов – La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu. Близкими по геохимическим связям являются Mg-Al, Sc-Ti, Fe, Ga, Ge, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Lu-Hf-Ta, платиновая группа металлов – Ag-Au, Y-La-РЗЭ, Au-Bi, Th-U. Выделенные геохимические диады, триады, тетрады, другие комплексы составляют последовательные цепочки элементов II-VI периодов в таблице Д.И. Менделеева. Они сочетаются как в углях, так и в золах от их сжигания, причем в золах от сжигания углей содержание больше в десятки раз.

Так, в промышленных содержаниях в кузнецких золошлаковых материалах (ЗШМ) литий составляет в среднем 0,6%, что больше промышленно-значимой кондиции в 6 раз. Промышленное содержание галлия отмечено в 13 объектах добычи кузнецких углей, среднее содержание 120,6 г/т, то есть этот элемент представляет инте-

рес для его извлечения именно из зол углей, так как его минимальная кондиция для бедных руд – 50-70 г/т, что меньше выявленной в кузнецких углях ( $Ga > 100,0$  г/т). Так, для трех крупных ТЭЦ с пылеугольным сжиганием тощих углей Донбасса и Кузбасса выявлено, что, с учетом доверительного интервала, весьма существенная или даже преобладающая доля исходного галлия (от 48 до 76%) выбрасывается в атмосферу, что подтверждается распределением концентраций Ga между тонкими ( $< 0,05$  мм) и грубыми фракциями зольного уноса.

Обогащение галлием тонких фракций (до 3,8 раз) показывает, что он выбрасывается в основном в составе летучей золы и меньше – в газовой фазе. Приняв содержание Ga в исходных углях в среднем 10 г/т, рассчитано, что при ежесуточном сжигании 5000 т угля, годовой выброс Ga составит в среднем 11,3 т. При промышленном сжигании углей на ТЭС галлий сильно обогащает зольные уносы. С учетом российского норматива (20 г/т угля и 100 г/т золы) зольные уносы от сжигания галлиеносных углей могут быть реальным сырьевым источником галлия.

Максимальное содержание стронция в кузнецких ЗШМ составляет 2,28%, что на 78,8% отвечает расчетному максимуму. В пластах кузнецких углей на полях шахт и разрезов выделены участки с продуктивными суммами РЗЭ. Последние условно подразделяются на две серии – LREE – легкие редкие земли: Ce, Pr, Nd, Sm, Eu; HREE – тяжелые редкие земли: Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu; вся группа 13 РЗЭ тесно связана с иттрием и лантаном, объединяемых в литературе в единый комплекс РЗЭ. В исследованных объектах определено содержание РЗЭ, в том числе в ЗШМ (количество проб / содержание в г/т / отношение к зольному кларку): Y (517/159,86/2,8); La (513/162,07/2,1); Ce (469/230,86/1,6); Sm (458/22,12/1,6); Eu (348/5,22/2,0); Tb (378/5,97/2,8); Yb (532/14,57/2,1); Lu (437/373/2,9). Вычисленные зольные кларковые концентрации оказались в пределах 1,6-2,9. Тот же набор элементов по 4 пробам представлен следующим рядом отношений: Y (0,55); La (0,95); Ce (1,23); Sm (0,76); Eu (0,8); Tb (0,73); Yb (0,78); Lu (0,64).

Существующие к настоящему времени кондиции для извлечения суммы РЗЭ составляют 0,1-0,5% для эндогенных руд, в корах выветривания – до 10%. Для каменных углей кондиции по сумме РЗЭ не разработаны, но их предельное содержание в кузнецких ЗШМ может составить не менее 1,4%. Содержания иттрия в пределах 0,017-0,150% размещены в направлении от севера к югу по геолого-экономическим районам Кузбасса.

С учетом вышесказанного, в углях отмечено относительно невысокое содержание большинства цветных и редких металлов (если только не присутствуют геохимические аномалии), поэтому практический интерес представляет извлечение ценных цветных и редких металлов из золошлаковых отвалов предприятий теплоэнергетики, где их запасы могут составить тысячи тонн, десятки тысяч тонн и более. Ценные металлы можно также извлекать из зол уноса, где их содержание в 2-3 раза выше, чем в золоотвалах.

В настоящей работе исследовались золошлаковые отходы ГРЭС и ТЭЦ Кузбасса. Для получения объективной картины выбраны для изучения содержания редких и редкоземельных элементов твердые отходы тепловых станций в северном, центральном и южном регионах Кемеровской области. Проанализированы образцы золошлаков Кемеровской ГРЭС, Беловской ГРЭС и Томусинской ТЭЦ.

Анализы на содержание матричных элементов проведены на оптико-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой iCAP 7400 Duo, анализы на содержание редких и редкоземельных элементов проводились методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) в комплекте с оборудованием для пробоподготовки на квадрупольном масс-спектрометре низкого разрешения Agilent 7500 сх, в работе использовались многоэлементные и одноэлементные растворы производства Agilent Technologies (США), азотная кислота (о.с.ч.), соляная кислота (о.с.ч.), фтороводородная кислота (о.с.ч.), хлорная кислота (х.ч.), нитрат лития (pure, Claisse, Канада).

Полученные данные по средним и промышленно значимым содержаниям ценных элементов в углях

и золах предприятий теплоэнергетики севера, юга и центральной части Кемеровской области приведены в *табл. 1, 2*.

Следует отметить, что в *табл. 1* приведены данные только по семи редкоземельным металлам, а в *табл. 2* – по четырем и нет данных по радиоактивным урану и торью.

Сопоставление полученных данных с имеющимися литературными источниками свидетельствует о том, что золошлаковые отходы кузнецких углей содержат промышленно значимые кондиции циркония, ниобия, галлия, молибдена, ванадия, селена, гафния и золота. Содержание скандия, иттрия, церия, неодима, иттербия, самария близки к промышленно значимому. Минимальное содержание остальных редких и редкоземельных металлов ниже промышленно значимых кондиций, однако все они содержатся в кузнецких углях. Особенно важно отметить, что в золошлаках имеется значительное количество редкоземельных металлов иттриевой группы, представляющих высокую и непрерывно растущую ценовую категорию вследствие большой востребованности в высокотехнологичных отраслях современной экономики.

Таблица 1

**Среднее содержание редких и редкоземельных элементов в углях и золах углей, а также оценка возможной промышленной значимости, г/т [3]**

Average content of rare and rare-earth elements in coals and coal ash, as well as an assessment of the potential industrial significance, g/t [3]

Элемент	Среднее, г/т		Максимальное значение в золе угля, г/т	Минимальное возможное промышленное значимое, г/т	
	в угле	в золе угля		для угля	для золы угля
Sc	13,5	147	489	10	50
Cr	31	280	1937	–	7000
Co	17,3	208	703	20	100
Zn	34,8	268	1344	400	2000
As	1,8	23,1	147	–	–
Rb	2,8	22,9	150	–	175
Sr	3,18	269	1043	400	2000
Ag	<0,5	0,1	3,1	1	5
Sb	0,63	8,9	63,6	30	150
Cs	0,37	3	17,5	–	150
Ba	1,6	590	9296	5	–
Hf	0,34	15,5	164	–	25
Ta	0,34	3,3	27,9	–	5
Au	0,003	0,04	0,15	0,02	0,1
La	18,7	180	752	150	750
Ce	36,1	286	1162	–	–
Nd	18,5	166	625	–	–
Sm	4,3	36,2	98	–	–
Eu	0,98	10,8	32,3	–	–
Tb	0,94	10,8	31,4	–	–
Yb	3,0	34,2	119	1,5	7,5
Lu	0,36	4,7	14,2	–	–
Th	5,8	55,2	360	–	–
U	2,4	25,6	134	–	–

Таблица 2

**Минимальное содержание элементов, определяющее промышленную значимость зол углей как источников рудного сырья [3]**

Minimum content of elements that determine the industrial significance of coal ash as a source of ore materials [3]

Элемент	Содержание, г/т
Бериллий	20
Бор	10000
Ванадий	500
Висмут	5
Вольфрам	150
Галлий	100
Гафний	25
Германий	150
Золото	0,1
Индий	1
Иттрий	75
Иттербий	7,5
Кадмий	5
Кобальт	100
Лантан	750
Литий	175
Марганец	10000
Медь	500
Молибден	30
Никель	500
Ниобий	50
Олово	100
Палладий	0,025
Платина	0,025
Рений	0,5
Рубидий	175
Ртуть	5
Селен	5
Серебро	5
Свинец	1200
Скандий	50
Стронций	2000
Сурьма	150
Таллий	5
Тантал	5
Теллур	5
Титан	7500
Хром	7000
Цезий	150
Цинк	2000
Цирконий	600

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Золошлаковые материалы Кемеровской области перспективны для извлечения концентратов редких и редкоземельных элементов, и отработанные технологии их извлечения создадут возможности для получения востребованных продуктов для высокотехнологичных отраслей экономики. Разработка и внедрение высокоселективных технологий для выделения редких и редкоземельных элементов из угольных отходов позволят существенно повысить рентабельность отходов углепереработки и улучшить экологическую обстановку в регионе.

**Список литературы**

1. Петренко И.Е. Итоги работы угольной промышленности России за 2021 год // Уголь. 2022. № 3. С. 9-23. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-3-9-23.
2. Геохимия, минералогия и генезис редкометалльно-угольного месторождения в пласте XI на юге Кузнецкого бассейна / С.И. Арбузов, А.В. Вергунов, С.С. Ильенок и др. // Геосферные исследования. 2019. № 2. С.35-61.
3. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Ценные элементы-примеси в углях. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 538 с.
4. Нифантов Б.Ф., Потапов В.П., Митина Н.В. Геохимия и оценка ресурсов редкоземельных и радиоактивных элементов в кузнецких углях. Перспективы переработки. Кемерово: Институт угля и углехимии СО РАН, 2003. 104 с.
5. Кондаков А.Н., Возная А.А. Минеральные ресурсы недр Кемеровской области. Кн. 1. Металлические полезные ископаемые. Кемерово: КузГТУ; ООО «ИНТ», 2013. 290 с.
6. Скурский М.Д. Прогноз месторождений алмазов, редкоземельных металлов Сибири. Становление производительных сил России. Кемерово: АИ «Кузбассвуиздат», 2017. 231 с.
7. Угли Кузбасса, химические элементы-примеси и технологии их извлечения при комплексном освоении месторождений / Б.Ф. Нифантов, В.П. Потапов, Б.А. Анферова и др. // Кемерово: Институт угля и углехимии СО РАН, 2011. 310 с.
8. Зоря В.Н. Исследование техногенных отходов черной металлургии, в том числе отходов от обогащения и сжигания углей, и разработка технологий их переработки: дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.07 / Зоря Вячеслав Николаевич; СибГИУ; науч. рук. Е.П. Волюнкина. Новокузнецк, 2015. 207 с.
9. Краснов О.С., Салихов В.А. Оценка перспектив извлечения ценных цветных и редких металлов из золошлаковых отходов энергетических предприятий Кемеровской области // Записки Горного института. 2013. Т. 201 «Проблемы развития минерально-сырьевого и топливно-энергетического комплексов России». С. 191-195.
10. A Comprehensive Review of Rare Earth Elements Recovery from Coal-Related Materials / Zhang Wencai, Noble Aaron, Yang Xinbo et al. // Minerals. 2020. Vol. 10. No 5. P. 451.
11. A review of rare earth elements and yttrium in coal ash: content, modes of occurrences, combustion behavior, and extraction methods / Fu Biao, Hower J., Zhang Wencai, et al. // Progress in Energy and Combustion Science. 2022. Vol. 88. P. 100954.
12. Choudhary A., Kumar Santosh, Maity S. A review on mineralogical speciation, global occurrence and distribution of rare earths and

Yttrium (REY) in coal ash // Journal of Earth System Science. 2022. 131(188).

13. Research progress of rare earth separation methods and technologies / M. Traore, A. Gong, Wang Yiwen et al. // Journal

of Rare Earths Research progress of rare earth separation methods and technologies 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jre.2022.04.009> (дата обращения: 15.11.2022).

Original Paper

COAL PREPARATION

UDC 662.74:552.57 © T.G. Cherkasova, A.V. Tikhomirova, E.V. Cherkasova, A.V. Nevedrov, A.V. Papin, 2022  
ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2022, № 512, pp. 67-71  
DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-512-67-71>

**Title**  
**COAL AS A RAW MATERIAL FOR KNOWLEDGE-INTENSIVE INDUSTRIES**

**Authors**

Cherkasova T.G.<sup>1</sup>, Tikhomirova A.V.<sup>1</sup>, Cherkasova E.V.<sup>1</sup>, Nevedrov A.V.<sup>1</sup>, Papin A.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Gorbachev's Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation

**Authors Information**

**Cherkasova T.G.**, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Director of the Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies, e-mail: [ctg.htnv@kuzstu.ru](mailto:ctg.htnv@kuzstu.ru)

**Tikhomirova A.V.**, PhD (Chemical), Associate Professor, Associate Professor of the Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies, e-mail: [tav.htnv@kuzstu.ru](mailto:tav.htnv@kuzstu.ru)

**Cherkasova E.V.**, PhD (Chemical), Associate Professor, Head of the Department of Chemical Technology of Inorganic Substances and Nanomaterials, e-mail: [chev.htnv@kuzstu.ru](mailto:chev.htnv@kuzstu.ru)

**Nevedrov A.V.**, PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies, e-mail: [nevedrov@kuzstu.ru](mailto:nevedrov@kuzstu.ru)

**Papin A.V.**, PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies, e-mail: [pav.httt@kuzstu.ru](mailto:pav.httt@kuzstu.ru)

**Abstract**

During the operation of thermal power plants, a huge amount of ash and slag waste is generated, which pollute the environment and are disposed of only by 10%. It is necessary to consider coal as a complex raw material. Kuzbass ash slags can be used to extract expensive rare and rare earth elements (REE), which significantly increases the profitability of the coal industry by obtaining both metals and functional materials based on them. The ash and slag wastes of the Kuzbass GRES and CHP plants were studied using optical emission spectrometry and inductively coupled plasma mass spectrometry. The data obtained indicate that the ash slags of Kuznetsk coal contain industrially significant conditions of many rare and rare earth metals or their contents are close to industrially significant.

**Keywords**

Coal, Coal wastes, Rare, Trace and rare-earth elements, Ash and slag materials.

**References**

- Petrenko I.E. Russia's coal industry performance for January – December, 2021. Ugol', 2022, (3), pp. 9-23. (In Russ.). DOI: [10.18796/0041-5790-2022-3-9-23](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-3-9-23).
- Arbuzov S.I., Vergunov A.V., Ilyenok S.S., Ivanov V.A. & Ivanov V.P. Geochemistry, mineralogy and genesis of a rare-metal and coal deposit in Bed XI in the southern part of the Kuznetsk Basin. Geosfernye issledovaniya, 2019, (2), pp. 35-61. (In Russ.).
- Yudovich Ya.E. & Ketris M.P. Valuable elements-coal impurities. Yekaterinburg, Urals Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006, 538 p. (In Russ.).
- Nifantov B.F., Potapov V.P. & Mitina N.V. Geochemistry and resource estimation of rare-earth and radioactive elements in the Kuznetsk coals. Prospects of extraction. Kemerovo, Institute of Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2003, 104 p. (In Russ.).
- Kondakov A.N. & Voznaya A.A. Mineral subsoil resources of the Kemerovo region. Book 1. Metallic minerals. Kondakov. Kemerovo, Gorbachev's Kuzbass State Technical University; INT Publ., 2013, 290 p. (In Russ.).

6. Skursky M.D. Forecast of diamond and rare-earth metals deposits in Siberia. Shaping the productive forces of Russia. Kemerovo, Kuzbassvuzizdat Publ., 2017, 231 p. (In Russ.).

7. Nifantov B.F., Potapov V.P., Anferova B.A. & Kuznetsova L.V. Kuzbass coals: Chemical elements-impurities and technologies of their extraction in integrated development of deposits. Kemerovo, Institute of Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2011, 310 p. (In Russ.).

8. Zorya V.N. Studies of man-made waste of ferrous metallurgy, including the waste from coal preparation and combustion, and the development of technologies for their processing. PhD (Engineering) diss.: 05.16.07 / Zorya Vyacheslav Nikolayevich; SibGIU; Scientific Supervisor: Volynkina E.P. Novokuznetsk, 2015, 207 p. (In Russ.).

9. Krasnov O.S. & Salikhov V.A. Assessment of the prospects for extraction of valuable non-ferrous and rare metals from ash and slag waste of power generating facilities in the Kemerovo Region. Zapiski Gornogo instituta, 2013, Vol. 201 "Challenges in the development of the mineral and fuel-energy complexes of Russia", pp. 191-195. (In Russ.).

10. Zhang Wencai, Noble Aaron, Yang Xinbo & Honaker Rick. A Comprehensive Review of Rare Earth Elements Recovery from Coal-Related Materials. Minerals, 2020, 10(5): 451.

11. Fu Biao, Hower J., Zhang Wencai, Luo Guangqian, Hu Hongyun & Yao H. A review of rare earth elements and yttrium in coal ash: content, modes of occurrences, combustion behavior, and extraction methods. Progress in Energy and Combustion Science, 2022, (88), pp. 100954.

12. Choudhary A., Kumar Santosh & Maity S. A review on mineralogical speciation, global occurrence and distribution of rare earths and yttrium (REY) in coal ash. Journal of Earth System Science, 2022, 131(188).

13. Traore M., Gong A., Wang Yiwen, Qiu L, Bai Yuzhen, Zhao Weiyu, Liu Yang, Chen Yi, Liu Y, Wu Huilin, Li Shuli & You Yueyi. Research progress of rare earth separation methods and technologies. Journal of Rare Earths, 2022. [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jre.2022.04.009> (accessed 15.11.2022).

14. Traore M., Gong A., Wang Yiwen, Qiu L, Bai Yuzhen, Zhao Weiyu, Liu Yang, Chen Yi, Liu Y, Wu Huilin, Li Shuli & You Yueyi. Research progress of rare earth separation methods and technologies. Journal of Rare Earths, 2022. [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jre.2022.04.009> (accessed 15.11.2022).

15. Traore M., Gong A., Wang Yiwen, Qiu L, Bai Yuzhen, Zhao Weiyu, Liu Yang, Chen Yi, Liu Y, Wu Huilin, Li Shuli & You Yueyi. Research progress of rare earth separation methods and technologies. Journal of Rare Earths, 2022. [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jre.2022.04.009> (accessed 15.11.2022).

16. Traore M., Gong A., Wang Yiwen, Qiu L, Bai Yuzhen, Zhao Weiyu, Liu Yang, Chen Yi, Liu Y, Wu Huilin, Li Shuli & You Yueyi. Research progress of rare earth separation methods and technologies. Journal of Rare Earths, 2022. [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jre.2022.04.009> (accessed 15.11.2022).

**Acknowledgements**

The research was financially supported by a grant from the Russian Ministry of Education and Science (Agreement No. 075-15-2022-1194).

**For citation**

Cherkasova T.G., Tikhomirova A.V., Cherkasova E.V., Nevedrov A.V. & Papin A.V. Coal as a raw material for knowledge-intensive industries. Ugol', 2022, (512), pp. 67-71. (In Russ.). DOI: [10.18796/0041-5790-2022-512-67-71](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-512-67-71).

**Paper info**

Received November 1, 2022

Reviewed November 15, 2022

Accepted November 30, 2022