



УДК 539.215.2:546[65+289]:62-665.4

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИХ ФРАКЦИЯХ ОТХОДОВ УГЛЕБОГАЩЕНИЯ АО ЦОФ «БЕРЕЗОВСКАЯ»

Черкасова Т.Г., Баранцев Д.А.

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева



### Информация о статье

Поступила:  
15 сентября 2023 г.

Рецензирование:  
26 ноября 2023 г.

Принята к печати:  
04 декабря 2023 г.

### Ключевые слова:

отходы угледобычи, углеобогащения и углепереработки; золошлаки; элементный, спектрохимический, рентгенографический, гранулометрический анализ; концентрирование; германий; редкоземельные элементы

### Аннотация.

Влияние таких факторов, как высокие требования к качеству угля на мировом рынке, санкционное давление, переход на «зеленую энергетику», формирование больших объемов отходов угольной промышленности и антропогенная нагрузка на окружающую среду, требуют от отечественных предприятий угольной отрасли внедрять новые технологии, снижающие производственные издержки и позволяющие организовывать производство переработки углей, а также отходов в продукцию высоких переделов. В этой связи технологии комплексной переработки отходов угледобычи и углепереработки с целью извлечения ценных компонентов, таких как редкие и редкоземельные элементы (РЗЭ), имеют наибольший потенциал. Поэтому важную роль при подборе возможных путей переработки отходов играют знания элементного и минералогического составов исходного сырья. В данной работе представлены результаты гранулометрического анализа образцов флотации и промпродукта, взятых с различных стадий технологической линии углеобогащения предприятия АО ЦОФ «Березовская», г. Березовский. Определено содержание породообразующих оксидов и элементный, фазовый составы каждой фракции. На основании полученных данных сделан вывод об эффективности рассеивания с целью получения угольного концентрата с зольностью 33,4% масс., а также фракций с повышенным содержанием суммарного концентрата РЗЭ и германия.

**Для цитирования:** Черкасова Т.Г., Баранцев Д.А. Распределение химических элементов в гранулометрических фракциях отходов углеобогащения АО ЦОФ «Березовская» // Техника и технология горного дела. – 2023. – № 4(23). – С. 26-40. – DOI: 10.26730/2618-7434-2023-4-26-40, EDN: ZOWFQC

### Введение

Существенные перемены на рынках сбыта российской продукции угольной отрасли связаны с санкционными ограничениями в отношении РФ и подписанием Парижского соглашения по климату. Отказ стран ЕС от поставок российского угля стимулировал отечественную угольную отрасль к поиску новых рынков сбыта [1]. Внедрение возобновляемых источников энергии предполагает отказ от угольного топлива, при этом большинство развитых стран мира оперирует негативным влиянием на экологию последствий сжигания угля, несмотря на то, что наибольшие выбросы приходится на долю нефти и природного газа (72,6 млн т), тогда как на уголь – всего 5,8 млн т. [2].

Глобальные тенденции мирового развития в ближайшие десятилетия требуют от российских предприятий угольной отрасли искать пути сокращения издержек и создавать большее разнообразие в выпускаемой основной и сопутствующей продукции. В этой связи наибольшим потенциалом роста обладают технологии комплексной переработки по причине наличия



огромных объемов вскрышных пород и отходов углепереработки [3, 4]. Установлено, что в данных типах отходов содержатся промышленно значимые концентрации циркония, ниобия, галлия, молибдена, ванадия, селена, гафния, золота, а также редкоземельные металлы (РЗМ) [4], имеющие большой спрос на рынке высоких технологий [5]. Данное направление позволяет увеличить сырьевую базу за счет нового минерального сырья [6].

В настоящее время большое количество отечественных научных работ посвящено разработкам технологии применения отходов угольной промышленности в строительной сфере, в частности получения бетона высокой прочности, керамзита, связующих минеральных добавок [7, 8], керамики [9, 10], тампонажных растворов [11], закладочных смесей [12], а также разработкам технологий применения отходов углеобогащения в качестве топлива: суспензионного водоугольного топлива [13, 14] и угольных брикетов [15]. Разработаны способы получения сорбентов из угольной золы [12]. Доля работ по извлечению металлов из отходов невелика и посвящена химическим и бактериальным методам выщелачивания [16-19], магнитной сепарации [20], сорбции РЗМ на катионите [21], электродинамической сепарации, извлечению золота и других ценных компонентов из угольной золы гравитационными методами обогащения [22, 23].

Из числа стран СНГ большой интерес к вопросу переработки угольной золы проявляет Казахстан, научные изыскания которого посвящены разработкам технологии извлечения металлов и других ценных компонентов с помощью азотнокислого выщелачивания [24], обжига золы в присутствии хлорида кальция с последующим солянокислым выщелачиванием [25], магнитной сепарации [26] и брикетирования отходов углеобогащения [27].

Лидирующие позиции в данном направлении по объему научных разработок принадлежат Китаю и США [28-39], которые при разработке высокоэффективных технологий извлечения РЗМ используют не только классические методы кислотного вскрытия и выщелачивания [30, 36], но и спекание с оксидами и солями щелочных и щелочноземельных металлов [30, 32, 33, 35, 36], экстракцию сверхкритическими жидкостями с многоступенчатой отгонкой [28], физические методы обогащения [34, 36, 37], ионный обмен [38] и экстракцию [39].

Для подбора эффективных методов переработки отходов необходимо иметь четкое представление об элементном и минералогическом составе в исследуемых образцах, так как в зависимости от месторождения угля для полного извлечения РЗЭ могут требоваться различные реагенты [30]. С другой стороны, многие отходы угольной отрасли имеют широкий диапазон размера частиц, а согласно научным данным, распределение РЗМ в частицах происходит неравномерно: для зол уноса характерна закономерность увеличения общей концентрации редкоземельных элементов в мелкодисперсной фракции [31].

### **Методы исследования**

В данной работе рассматривается распределение элементов в зависимости от фракционного состава некоторых отходов углеобогащения, взятых с АО ЦОФ «Березовская», г. Березовский. Исходные образцы отходов флотации (БФ-1 класса 0-0,5 мм) и промпродукта (БФ-2 класса 0,5-13 мм) были высушены при 105°C до постоянной массы с последующим рассеиванием на фракции +4 мм, 2-4 мм, 1-2 мм, 0,032-1 мм и 0-0,032 мм на ситах, изготовленных по ТУ 4846-010-11149834, сетка из стали 12Х18Н9Т. Для каждого образца определена зольность по ГОСТ 11022-95 «Метод медленного озоления» и рассчитана массовая доля фракции. Содержание элементов в образцах определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) на приборе Agilent 7500сх.

Количественное определение порообразующих оксидов в образцах определено оптико-эмиссионной спектроскопией (ИСП-ОЭС) на приборе iCAP 7400 Duo.

Данные качественного и количественного рентгенофазового анализа получены на приборе DX-2700ВН.

### **Результаты и обсуждение**

По результатам исследований зольности в зависимости от гранулометрического состава отходов (Таблица 1) установлено, что фракции с размером более 1 мм имеют более высокое



содержание углеродной составляющей относительно исходных образцов. Наименьшая зольность 22,87% масс. в образце БФ-2(+4), что практически в три раза ниже, чем в исходном образце. Для обоих образцов отходов наблюдается такая закономерность: с уменьшением размера частиц происходит увеличение содержания минеральной части, а также суммарного содержания РЗМ (Таблицы 2, 3) за исключением образца промпродукта с размером частиц от 0 до 0,032 мм, где наблюдается понижение суммарного содержания редких металлов с 184,14 г/т до 177,58 г/т относительно образца БФ-2(03-1). Положительный результат, заключающийся в увеличении содержания редкоземельных металлов на 19,5% масс. от их начального количества, наблюдается в образце БФ-1(0-03). Отходы флотации и промпродукт содержат в себе частицы фракции от 0,032 до 1 мм в количестве 83,59 и 87,27% масс. Фракции промпродукта с размером более 2 мм были объединены и отквартованы, зольность полученной смеси составила 33,42% масс., что ниже предельной зольности для рядовых (не более 45% масс.) и каменных (не более 40% масс.) углей, поставляемых на рынок [40].

В образце БФ-1(0-03) наблюдается повышение концентрации большей части элементов, в частности, Li (с 54 до 93 г/т), Ga (с 11,8 до 17,3 г/т), Sr (с 455 до 740 г/т), Ba (с 875 до 1566 г/т), Ge (с 0,46 до 0,76 г/т). Состав порообразующих оксидов (Таблицы 4, 5) для данного образца изменился следующим образом:

- с 45,5 до 50,48% масс. для  $\text{SiO}_2$ , при этом доля кварца в образце выросла с 57 до 64% масс.;
- с 13,2 до 15,02% масс. для  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , при этом сумма глинистых минералов снизилась с 17 до 12% масс., а концентрация натриевого полевого шпата  $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$  возросла до 11% масс.;
- с 5 до 5,47% масс. для  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , при этом возросла доля сидерита ( $\text{FeCO}_3$ ) до 2% масс., и обнаружены следы магнетита ( $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ );
- с 2,44 до 3,23% масс. для  $\text{CaO}$  и увеличением доли кальцита ( $\text{CaCO}_3$ ) и доломита ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) на 4 и 7% масс. соответственно.

Таблица 1. Гранулометрический состав и зольность фракций отходов углеобогащения АО ЦОФ «Березовская»

Table 1. Granulometric composition and ash content of coal processing waste fractions of JSC CPP «Berezovskaya»

Образец	Фракционный состав, мм	Массовая доля фракции, % масс.	Зольность, % масс.	Суммарное содержание РЗМ, г/т
<b>БФ – 1</b>	<b>0 – 0,5</b>	<b>100</b>	<b>71,9</b>	<b>189,05</b>
БФ-1(+4)	+ 4	0,25	43,75	-
БФ-1(2-4)	2 – 4	2,86	61,65	132,58
БФ-1(1-2)	1 – 2	9,96	60,01	159,25
БФ-1(03-1)	0,032 – 1	83,59	75,44	194,17
БФ-1(0-03)	0 - 0,032	3,34	80,63	225,86
<b>БФ – 2</b>	<b>0,5 – 13</b>	<b>100</b>	<b>62,5</b>	<b>182,78</b>
БФ-2(+4)	+ 4	0,75	22,87	-
БФ-2(2-4)	2 – 4	2,33	37,04	109,97
БФ-2(1-2)	1 – 2	5,80	52,64	152,60
БФ-2(03-1)	0,032 – 1	87,27	70,36	184,14
БФ-2(0-03)	0 - 0,032	3,82	81,35	177,58

В целом для отходов флотации наблюдается следующая закономерность распределения минералов в гранулометрических фракциях: с увеличением размера частиц возрастает содержание глинистых минералов, тогда как с уменьшением размера фракции увеличивается содержание кварца, доломита.



Таблица 2. Результаты ИСП-МС-анализа порошков исходного образца и различных фракций отходов флотации АО ЦОФ «Березовская»

Table 2. Results of ICP-MS analysis of powders of the initial sample and various fractions of flotation waste of JSC CPP «Berezovskaya»

Номер образца/ Элемент	БФ-1		БФ-1(0-03)		БФ-1(03-1)		БФ-1(1-2)		БФ-1(2-4)	
	X	±Δ	X	±Δ	X	±Δ	X	±Δ	X	±Δ
Литий (Li)	54	11	<b>93</b>	20	58	12	47	10	36	8
Бериллий (Be)	2,3	0,8	<b>2,7</b>	0,9	2,2	0,7	2,0	0,6	1,7	0,5
Скандий (Sc)	10,8	2,3	<b>12,1</b>	2,5	11,4	2,4	9,3	3,0	7,5	2,4
Титан (Ti)	3065	521	<b>3588</b>	610	3171	539	2567	436	2139	364
Ванадий (V)	60	13	<b>67</b>	14	63	13	52	11	42	9
Хром (Cr)	34	7	<b>50</b>	10	46	10	36	8	28	6
Марганец (Mn)	347	73	342	72	384	81	307	65	234	49
Кобальт (Co)	8,6	2,8	<b>10,4</b>	2,2	9,0	2,9	8,5	2,7	7,9	2,5
Никель (Ni)	14,3	3	<b>18,8</b>	3,9	15,8	3,3	15,2	3,2	28	6
Медь (Cu)	19	4	<b>25</b>	5	27	6	20	4	17,1	3,6
Цинк (Zn)	22	5	<b>81</b>	17	77	16	52	11	45	9
Галлий (Ga)	11,8	2,5	<b>17,3</b>	3,6	10,3	2,2	8,6	2,8	7,1	2,3
Рубидий (Rb)	79	17	<b>90</b>	19	82	17	67	14	52	11
Стронций (Sr)	455	96	<b>740</b>	126	485	102	369	78	324	68
Иттрий (Y)	25	5	<b>32</b>	7	26	5	21	4	17,5	3,7
Цирконий (Zr)	162	34	<b>190</b>	40	166	35	139	29	119	25
Ниобий (Nb)	9,2	3	<b>10,4</b>	2,2	8,8	2,8	7,2	2,3	6,5	2,1
Цезий (Cs)	5,4	1,7	4,4	1,4	3,6	1,1	3,0	1,0	2,4	0,8
Барий (Ba)	875	149	<b>1566</b>	266	867	147	722	123	602	102
Лантан(La)	33	7	<b>37</b>	8	33	7	27	6	23	5
Церий (Ce)	60	13	<b>72</b>	15	63	13	52	11	43	9
Празеодим (Pr)	7,1	2,3	<b>8,5</b>	2,7	7,5	2,4	6,1	2,0	5,0	1,6
Неодим (Nd)	30	6	<b>34</b>	7	29	6	24	5	20	4
Самарий (Sm)	5,7	1,8	<b>7,3</b>	2,3	6,0	1,9	4,8	1,5	4,1	1,3
Европий (Eu)	1,16	0,37	<b>1,7</b>	0,5	1,11	0,36	1,04	0,33	0,80	0,26
Гадолиний (Gd)	4,6	1,5	<b>6,1</b>	2,0	4,9	1,6	3,9	1,3	3,3	1,1
Тербий (Tb)	0,76	0,24	<b>1,03</b>	0,33	0,80	0,26	0,65	0,21	0,55	0,18



Номер образца/ Элемент	БФ-1		БФ-1(0-03)		БФ-1(03-1)		БФ-1(1-2)		БФ-1(2-4)	
	X	$\pm\Delta$	X	$\pm\Delta$	X	$\pm\Delta$	X	$\pm\Delta$	X	$\pm\Delta$
Диспрозий (Dy)	3,9	1,2	<b>5,2</b>	1,7	4,1	1,3	3,4	1,1	2,8	0,9
Гольмий (Ho)	0,88	0,28	<b>1,16</b>	0,37	0,92	0,29	0,75	0,24	0,62	0,20
Эрбий (Er)	2,5	0,8	<b>3,3</b>	1	2,6	0,8	2,2	0,7	1,8	0,6
Тулий (Tm)	0,38	0,12	<b>0,41</b>	0,13	0,34	0,11	0,28	0,09	0,24	0,08
Иттербий (Yb)	2,9	0,9	<b>3,6</b>	1,2	3,1	1,0	2,5	0,8	2,1	0,7
Лютеций (Lu)	0,37	0,12	<b>0,46</b>	0,15	0,40	0,13	0,33	0,11	0,27	0,09
Гафний (Hf)	3,7	1,2	<b>4,3</b>	1,4	3,9	1,2	3,2	1,0	2,8	0,9
Тантал (Ta)	0,75	0,24	<b>0,90</b>	0,29	0,79	0,25	0,65	0,21	0,58	0,19
Вольфрам (W)	1,04	0,36	<b>1,3</b>	0,4	1,3	0,4	0,91	0,29	1,13	0,36
Таллий (Tl)	0,54	0,17	<b>0,63</b>	0,20	0,61	0,20	0,51	0,16	0,41	0,13
Свинец (Pb)	18,2	3,8	<b>24</b>	5	20	4	15,5	3,2	12,7	2,7
Торий (Th)	10,3	2,2	<b>12,4</b>	2,6	10,7	2,2	9,0	2,9	7,3	2,4
Уран (U)	3	1	<b>3,5</b>	1,1	3,1	1,0	2,5	0,8	2,1	0,7
Железо (Fe)	-	-	20265	3040	19858	2979	16599	2490	12337	1851
Германий (Ge)	0,46	0,18	<b>0,76</b>	0,31	0,88	0,35	1,11	0,39	0,89	0,36
Селен (Se)	2,1	0,7	<b>3,2</b>	1,1	3,0	1,0	3,3	1,2	2,6	0,9
Молибден (Mo)	1,8	0,6	<b>2,7</b>	1,0	2,7	0,9	15	0,9	2,0	0,7
Рутений (Ru)	0,041	0,018	0,010	0,005	0,0061	0,0031	0,0079	0,0040	0,0053	0,0026
Палладий (Pd)	0,62	0,25	<b>0,079</b>	0,035	0,052	0,024	0,052	0,023	0,046	0,021
Серебро (Ag)	0,09	0,04	<b>0,29</b>	0,12	0,41	0,16	0,22	0,09	0,17	0,07
Кадмий (Cd)	0,11	0,04	<b>0,33</b>	0,13	0,26	0,10	0,24	0,09	0,19	0,08
Олово (Sn)	1,8	0,6	<b>4,7</b>	1,6	3,3	1,1	2,9	1,0	2,4	0,8
Сурьма (Sb)	0,9	0,36	<b>2,2</b>	0,8	1,8	0,6	1,5	0,5	1,11	0,39
Теллур (Te)	0,033	0,015	0,025	0,011	0,009	0,004	0,017	0,008	0,0011	0,0006
Платина (Pt)	0,068	0,03	0,046	0,021	0,043	0,019	0,059	0,026	0,038	0,017
Золото (Au)	0,074	0,033	<b>0,15</b>	0,06	0,14	0,06	0,13	0,05	0,11	0,04
Висмут (Bi)	0,042	0,019	<b>0,26</b>	0,10	0,21	0,08	0,22	0,09	0,18	0,07



Таблица 3. Результаты ИСП-МС-анализа порошков исходного образца и различных фракций промпродукта АО ЦОФ «Березовская»

Table 3. Results of ICP-MS analysis of powders of the initial sample and various fractions of the industrial product of JSC CPP «Berezovskaya»

Номер образца/ Элемент	БФ-2		БФ-2(0-03)		БФ-2(03-1)		БФ-2(1-2)		БФ-2(2-4)	
	X	±Δ	X	±Д	X	±Д	X	±Д	X	±Д
Литий (Li)	35	7	38	8	32	7	28	6	20	4
Бериллий (Be)	2,1	0,7	1,7	0,5	2,0	0,6	1,9	0,6	1,4	0,4
Скандий (Sc)	11,9	2,5	12,2	2,6	12,5	2,6	9,6	3,1	6,6	2,1
Титан (Ti)	2864	487	3490	593	2987	508	2581	439	1649	280
Ванадий (V)	64	13	69	15	69	14	55	12	34	7
Хром (Cr)	36	8	70	15	52	11	34	7	20	4
Марганец (Mn)	483	102	599	102	448	94	246	52	141	30
Кобальт (Co)	9,4	3	13,1	2,7	10,0	2,1	9,4	3,0	9,7	3,1
Никель (Ni)	17,2	3,6	23	5	28	6	11,5	2,4	10,8	2,3
Медь (Cu)	34	7	34	7	27	6	22	5	16,4	3,5
Цинк (Zn)	45	9	84	18	60	13	37	8	25	5
Галлий (Ga)	8,7	2,8	15,7	3,3	7,2	2,3	5,5	1,8	4,9	1,6
Рубидий (Rb)	72	15	67	14	87	18	61	13	33	7
Стронций (Sr)	269	56	390	82	277	58	187	39	192	40
Иттрий (Y)	27	6	30	6	27	6	21	4	14,9	3,1
Цирконий (Zr)	176	37	179	38	178	37	151	32	105	22
Ниобий (Nb)	9,5	3	10,1	2,1	8,7	2,8	8,0	2,6	5,9	1,9
Цезий (Cs)	4,7	1,5	2,9	0,9	3,7	1,2	2,8	0,9	1,6	0,5
Барий (Ba)	614	104	1467	249	535	91	400	84	381	80
Лантан (La)	30	6	27	6	30	6	25	5	18,4	3,9
Церий (Ce)	55	12	52	11	57	12	49	10	35	7
Празеодим (Pr)	6,6	2,1	6,2	2,0	6,6	2,1	5,6	1,8	4,2	1,3
Неодим (Nd)	29	6	25	5	27	6	23	5	16,9	3,6
Самарий (Sm)	5,5	1,8	5,5	1,8	5,6	1,8	4,6	1,5	3,5	1,1
Европий (Eu)	1,05	0,34	1,4	0,4	1,06	0,34	0,79	0,25	0,55	0,18
Гадолиний (Gd)	4,4	1,4	4,9	1,6	4,7	1,5	3,8	1,2	2,8	0,9
Тербий (Tb)	0,77	0,25	0,86	0,28	0,78	0,25	0,62	0,20	0,45	0,14



Номер образца/ Элемент	БФ-2		БФ-2(0-03)		БФ-2(03-1)		БФ-2(1-2)		БФ-2(2-4)	
	X	±Δ	X	±Δ	X	±Δ	X	±Δ	X	±Δ
Диспрозий (Dy)	4,1	1,3	4,6	1,5	4,2	1,3	3,3	1,1	2,4	0,8
Гольмий (Ho)	0,93	0,3	1,03	0,33	0,93	0,30	0,75	0,24	0,53	0,17
Эрбий (Er)	2,6	0,8	2,9	0,9	2,7	0,9	2,2	0,7	1,5	0,5
Тулий (Tm)	0,42	0,13	0,37	0,12	0,35	0,11	0,29	0,09	0,20	0,06
Иттербий (Yb)	3,1	1	3,2	1,0	3,3	1,0	2,7	0,9	1,8	0,6
Лютеций (Lu)	0,41	0,13	0,42	0,13	0,42	0,13	0,35	0,11	0,24	0,08
Гафний (Hf)	4	1,3	3,5	1,1	4,1	1,3	3,7	1,2	2,5	0,8
Тантал (Ta)	0,77	0,25	0,93	0,30	0,75	0,24	0,73	0,23	0,52	0,17
Вольфрам (W)	0,99	0,4	1,7	0,5	0,99	0,32	0,84	0,27	0,77	0,24
Таллий (Tl)	0,47	0,15	0,55	0,18	0,62	0,20	0,44	0,14	0,72	0,23
Свинец (Pb)	20	4	25	5	17,7	3,7	14,8	3,1	11,9	2,5
Торий (Th)	9,8	3,1	9,6	3,1	9,7	3,1	8,5	2,7	6,2	2,0
Уран (U)	3	1	2,9	0,9	2,8	0,9	2,5	0,8	1,8	0,6
Железо (Fe)	-	-	>50000		19395	2909	10511	1577	6279	1256
Германий (Ge)	<b>0,43</b>	0,17	<b>1,12</b>	0,39	0,60	0,24	0,83	0,33	0,69	0,27
Селен (Se)	2,3	0,8	2,5	0,9	2,4	0,8	2,9	1,0	1,9	0,7
Молибден (Mo)	2,3	0,7	3,6	1,3	3,5	1,2	2,6	0,9	1,9	0,7
Рутений (Ru)	0,015	0,007	0,012	0,005	0,0059	0,0030	0,0050	0,0025	0,0040	0,0020
Палладий (Pd)	0,39	0,15	0,041	0,019	0,031	0,014	0,027	0,012	0,028	0,013
Серебро (Ag)	0,071	0,032	0,25	0,10	0,24	0,10	0,20	0,08	0,13	0,05
Кадмий (Cd)	0,13	0,05	0,29	0,12	0,25	0,10	0,23	0,09	0,18	0,07
Олово (Sn)	1,7	0,6	3,8	1,3	3,3	1,2	3,1	1,1	2,1	0,7
Сурьма (Sb)	0,73	0,29	1,9	0,7	1,3	0,5	0,90	0,36	0,64	0,26
Теллур (Te)	0,043	0,019	0,030	0,014	0,017	0,008	0,021	0,009	0,0026	0,0013
Платина (Pt)	0,068	0,031	0,044	0,020	0,055	0,025	0,043	0,020	0,036	0,016
Золото (Au)	<b>0,06</b>	0,027	<b>0,20</b>	0,08	0,10	0,04	0,10	0,04	0,071	0,032
Висмут (Bi)	<b>0,017</b>	0,008	<b>0,20</b>	0,08	0,22	0,09	0,25	0,10	0,2	0,08



Таблица 4. Результаты ИСП-ОЭС-анализа образцов матричных элементов порошков исходных образцов и различных фракций после отсева отходов флотации и промпродукта АО ЦОФ «Березовская»

Table 4. Results of ICP-OES analysis of samples of matrix elements of powders of initial samples and various fractions after sieving of flotation waste and industrial products of JSC CPP «Berezovskaya»

Оксид/ Номер образца	SiO <sub>2</sub>		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		MnO		MgO	
	X	±Δ	X	±Δ	X	±Δ	X	±Δ	X	±Δ
БФ-1	45,5	0,9	13,2	0,9	5	0,4	0,05	0,02	1,08	0,19
БФ-1(0-03)	50,48	0,81	15,02	1,05	5,47	0,44	0,04	0,02	1,35	0,24
БФ-1(03-1)	47,62	0,95	13,54	0,95	5,19	0,42	0,05	0,02	1,19	0,21
БФ-1(1-2)	38,28	0,96	10,91	0,76	4,01	0,56	0,04	0,02	0,97	0,23
БФ-1(2-4)	30,56	0,76	8,87	1,15	2,96	0,41	0,03	0,01	0,76	0,18
БФ-2	40,4	0,8	11,5	0,8	6,2	0,5	0,06	0,03	1,06	0,19
БФ-2(0-03)	44,95	0,9	10,76	0,75	14,88	0,60	0,08	0,03	1,52	0,27
БФ-2(03-1)	45,90	0,92	10,25	0,72	5,17	0,41	0,06	0,02	1,02	0,18
БФ-2(1-2)	31,16	0,78	10,0	0,70	2,61	0,36	0,03	0,01	0,84	0,20
БФ-2(2-4)	<20,0		7,44	0,97	1,76	0,35	0,02	0,01	0,64	0,15
Оксид/ Номер образца	CaO		Na <sub>2</sub> O		K <sub>2</sub> O		TiO <sub>2</sub>		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
	X	±Δ	X	±Δ	X	±Δ	X	±Δ	X	±Δ
БФ-1	2,44	0,34	<1,00		2,41	0,39	0,53	0,09	0,11	0,02
БФ-1(0-03)	3,23	0,45	1,0	0,20	2,29	0,37	0,61	0,11	0,14	0,03
БФ-1(03-1)	2,75	0,38	<1,0		1,98	0,42	0,56	0,10	0,11	0,02
БФ-1(1-2)	1,94	0,37	<1,0		1,77	0,37	0,46	0,10	0,09	0,02
БФ-1(2-4)	1,50	0,29	<1,0		1,26	0,26	0,36	0,08	0,09	0,02
БФ-2	3	0,4	<1,0		2,04	0,33	0,49	0,11	0,16	0,03
БФ-2(0-03)	4,12	0,58	<1,0		1,70	0,36	0,56	0,10	0,17	0,03
БФ-2(03-1)	3,63	0,51	<1,0		1,99	0,42	0,51	0,09	0,14	0,03
БФ-2(1-2)	1,18	0,22	<1,0		1,48	0,31	0,42	0,09	0,13	0,02
БФ-2(2-4)	1,16	0,22	<1,0		0,78	0,19	0,30	0,07	0,12	0,02

Элементный анализ фракций промпродукта выявил значительное увеличение концентрации германия в образце БФ-2(0-03) с 0,43 до 1,12 г/т, что соответствует промышленно значимой концентрации для этого элемента.

Образец БФ-2(0-03) характеризуется меньшим содержанием суммы РЗМ (177,58 г/т) по отношению к исходному образцу (182,78 г/т). Содержание других элементов остается на исходном уровне или имеет незначительное уменьшение за исключением возросшего содержания Ga с 8,7 до 15,7 г/т и Ba с 614 г/т до 1467 г/т. Минералогический состав характеризуется возросшим содержанием кварца, кальцита, натриевого полевого шпата. Сумма глинистых минералов снизилась с 16% до 8%, при этом наблюдается заметное увеличение содержания Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – с 6,2 до 14,88 г/т – и появления в минеральной части 2% масс. магнетита.

В образце БФ-2(03-1) суммарное содержание РЗМ незначительно увеличилось: до 184,14 г/т относительно исходного образца, содержание остальных элементов остается на исходном уровне. Для образцов БФ-2(1-2) и БФ-2(2-4) наблюдается более низкое содержание всех элементов, в том числе и макрокомпонентов, но значительно возрастает суммарное содержание глинистых минералов – до 23% и 24% соответственно.



Таблица 5. Фазовый состав исходных образцов отходов углеобогащения АО ЦОФ «Березовская» и фракций после рассеивания  
Table 5. Phase composition of initial samples of coal processing waste of JSC CPP «Berezovskaya» and fractions after dispersion

Номер образца	Содержание минералов, %								
	Кварц	Кальцит	Сумма глинистых минералов	Натриевый полевой шпат	Доломит	Сидерит	Гематит	Магнетит	Плагиоклаз
БФ-1	<b>57</b>	<b>7</b>	<b>17</b>	-	-	-	-	-	-
БФ-1(0-03)	64	4	12	11	7	2	-	сл.	-
БФ-1(03-1)	62	4	13	14	4	3	-	-	-
БФ-1(1-2)	59	4	14	16	4	3	-	-	-
БФ-1(2-4)	56	3	17	19	3	2	-	сл.	-
БФ-2	<b>58</b>	<b>3</b>	<b>16</b>	-	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>6</b>		<b>7</b>
БФ-2(0-03)	67	5	8	11	5	2	-	2	-
БФ-2(03-1)	60	7	13	10	6	4	-	-	-
БФ-2(1-2)	59	3	23	9	4	2	-	-	-
БФ-2(2-4)	48	5	24	12	8	3	-	-	-

Анализ закономерности распределения минералов во фракциях промпродукта установил, что с уменьшением размера частиц понижается содержание глинистых минералов и увеличивается содержание кварца. Содержание остальных минералов распределено по фракциям неравномерно. Так, для образца БФ-2(1-2) наблюдается снижение содержания доломита и кальцита, что также выражается в снижении содержания СаО с 3,00 до 1,18% масс. относительно исходного образца.

### **Выводы**

Учитывая простоту разделения на фракции при рассеивании и низкую зольность в полученных образцах промпродукта с фракцией более 2 мм, данный метод обогащения можно использовать для извлечения угольного концентрата, пригодного для последующего обогащения или применения в качестве сырья для производства водоугольного топлива или топливных брикетов.

Увеличение содержание германия в образце БФ-2(0-03) позволяет использовать его как сырье для извлечения этого металла.

Установлено, что содержание РЗМ больше в более мелкой фракции, аналогичная зависимость наблюдается в распределении РЗЭ в золе уноса [41].

Для более мелких фракций наблюдается увеличение содержания кварца и, учитывая его свойства, для вскрытия необходимо использовать гидроксид натрия или фторид аммония. Аналогичные реактивы требуются для образцов с высоким содержанием натриевого полевого шпата.

Таким образом, рассев отходов углеобогащения позволяет получать фракции с более высоким содержанием ценных компонентов, чем в исходных образцах.

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

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



© 2023 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

## Информация об авторах

**Черкасова Татьяна Григорьевна**, д.х.н., профессор, директор Института химических и нефтегазовых технологий ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»  
e-mail: ctg.htnv@kuzstu.ru

**Баранцев Денис Александрович**, ассистент кафедры химии, технологии неорганических веществ и наноматериалов ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»  
e-mail: kemche@yandex.ru

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева  
650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

## Список литературы

1. Плакиткин Ю.А, Плакиткина Л.С, Дьяченко К.И. Развитие угольной отрасли под воздействием тенденций «зеленой» энергетики и санкционных ограничений // Уголь. 2023. № 8. С. 66-72. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-8-66-72.
2. Плакиткин Ю.А., Плакиткина Л.С. Пять базовых закономерностей глобальной энергетики, «Зеленая сделка» как сдерживающие факторы развития горнодобывающих отраслей ТЭК // Горная промышленность. 2021. № 4. С. 94-100. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-94-100.
3. Ефимов В.И., Никулин И.Б., Рыбак В.Л. Использование отходов углеобогащения и оптимизация ресурсов по экологическому фактору // Известия ТулГУ. Науки о земле. 2014. Вып. 1. С. 85-95.
4. Черкасова Т.Г., Черкасова Е.В., Тихомирова А.В., Пилин М.О., Баранцев Д.А. Анализ отходов угледобычи, углепереработки и углеобогащения месторождений Кузнецкого угольного бассейна // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 6(154). С. 59-66. DOI: 10.26730/1999-4125-2022-6-59-66.
5. Filho W.L., Kotter R., Özuyar P.G., Abubakar I.R., Matandirotya N.R. Understanding Rare Earth Elements as Critical Raw Materials // Sustainability. 2023. V. 15. С. 1919. DOI: 10.3390/su15031919.
6. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В. Использование техногенного сырья в производстве нерудных строительных материалов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2015. № 1. С. 111-117. DOI: 10.17213/0321-2653-2015-1-111-117.
7. Кара-сал Б.К., Чюдюк С.А. Вскрышные породы угледобычи – перспективное сырье для производства строительных материалов // Вестник. Технические и физико-математические науки. 2017. № 3. с. 98-103.
8. Абдрахимова Е.С. Использование отходов углеобогащения и межсланцевой глины в производстве керамического кирпича // Уголь. 2021. № 7.С. 52-55. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-7-52-55.
9. Талпа Б.В. Техногенные ресурсы угольного ряда Восточного Донбасса и перспективы их использования в керамической промышленности // Строительные материалы. 2018. № 8. С. 58–61. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-58-61.
10. Танг Ван Лам, Булгаков Б. И., Александрова О. В., Ларсен О. А., Шувалова Е. А., Дао Вьет Доан. Использование отходов углеобогащения с целью получения сырья для производства стенового керамического кирпича // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. Том 2. № 8. С. 12-19. DOI: 10.12737/article\_5968b44f705728.90480434.
11. Хмяляйнен В.А., Баев М.А. Экспериментальные исследования физико-механических свойств тампонажных растворов на основе цемента и отходов углеобогащения // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2013. № 6(100). С. 12-19.
12. Худякова Л.И., Залуцкий А.В., Палеев П.Л. Использование золошлаковых отходов тепловых электростанций // XXI ВЕК. Техносферная безопасность. 2019. № 4(3). С. 290-306. DOI: 10.21285/2500-1582-2019-3-375-391.



13. Мурко В. И., Баранова М. П. Обоснование инновационных направлений использования продуктов обогащения угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6. С. 131-141. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_6\_0\_131.
14. Обоснование технологических решений по переработке тонких угольных шламов на обогатительных фабриках АО «УК «Кузбассразрезуголь» / В.И. Мурко, А.И. Папченков, К.А. Голубин и др. // Уголь. 2022. № 7. С. 27-33. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-7-27-33.
15. Будаев С. С., Нифонтов Ю. А., Разработка новой технологии брикетирования угольных шламов Печорского бассейна // Научно-технический вестник ИОТТ, Люберцы. 1997. № 7. С. 4.
16. Блайда И.А., Васильева Т.В., Баранов В.И., Слюсаренко Л.И., Баклан В.Ю. Возможности бактериального и химического выщелачивания отходов углеобогащения с целью извлечения германия и галлия // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2013. № 1(4). С. 54-60.
17. Обработка угольной золы предприятий энергетики в процессах бактериального выщелачивания редкоземельных металлов / Ксенофонтов Б. С., Козодаев А. С., Таранов Р. А., Балина А. А., Виноградов М. С., Петрова Е. В. // Безопасность в техносфере. 2013. № 4. С. 17-22.
18. Патент РФ № RU2657149C1, 08.06.2018. Способ извлечения редкоземельных металлов и скандия из золошлаковых отходов // Патент России № 2657149. 2018. Бюл. № 16. / Кольцов В. Ю. [и др.].
19. Патент РФ № RU2293134C1, 10.02.2007. Способ извлечения редкоземельных металлов и иттрия из углей и золошлаковых отходов от их сжигания // Патент России № 2293134. 2007. Бюл. № 4. / Кузьмин В. И. [и др.].
20. Валеев Д. В., Варнавская А. Д. Изучение способов обогащения и солянокислотное выщелачивание зол угольных электростанций // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. № 3. С. 37-44. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.1.37-43.
21. Ксенофонтов Б. С., Козодаев А. С., Таранов Р. А., Сенник Е. В., Виноградов М. С., Воропаева А. А. Выщелачивание редкоземельных металлов из угольной золы и их концентрирование // Безопасность в техносфере. 2016. № 1. С.48-54. DOI: 10.12737/19023.
22. Энциклопедия технологий. Эволюция и сравнительный анализ ресурсной эффективности промышленных технологий / [гл. ред. Д.О. Скобелев]; ФГАУ «НИИ «ЦЭПП». – М.; СПб.: «Реноме», 2019.– 824 с.: ил.
23. Черепанов А.А., Кардаш В.Т. Комплексная переработка золошлаковых отходов ТЭЦ (результаты лабораторных и полупромышленных испытаний) // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2009. № 2. С. 98-115.
24. Балбекова Б. К., Таубаева Ш. М. Исследование возможности извлечения РЗЭ из золошлаковых отходов Карагандинской ТЭЦ // Наука и техника Казахстана. 2020. № 2. С. 82-87.
25. Досмухамедов Н.К., Каплан В.А., Даруеш Г.С. Инновационная технология комплексной переработки золы от сжигания угля // Уголь. 2020. № 1. С. 58-63. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-1-58-63.
26. Выделение железа в железосодержащий продукт из золы от сжигания Экибастузских углей / Н.К. Досмухамедов, В.А. Каплан, Е.Е. Жолдасбай и др. // Уголь. 2021. № 1. С. 56-61. DOI: 10.18796/0041-5790-2021- 1-56-61.
27. Разработка технологической схемы брикетирования отходов флотации / Т.И. Чернышова, Е.П. Набоко, Н.В. Алпатов // Наука и современность. 2015. № 36. С. 128-132.
28. Yaguang Z., Guangcheng W., Young-Shin J. Supercritical carbon dioxide/nitrogen/air extraction with multistage stripping enables selective recovery of rare earth elements from coal fly ashes // RSC Sustainability. 2023. V. 1. P. 251-260. DOI: 10.1039/d2su00033d.
29. An investigation into six coal fly ashes from the United Kingdom and Poland to evaluate rare earth element content / R.S. Blissett, N. Smalley, N.A. Rowson // Fuel. 2014. V. 119. P. 236-239. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.11.053.
30. Kinga J. F., Taggarta R. K., Smitha R. C., Howerb J. C., Hsu-Kima H. Aqueous acid and alkaline extraction of rare earth elements from coal combustion ash International Journal of Coal // Geology. 2018. V. 195. P. 75-83. DOI: 10.1016/j.coal.2018.05.009.
31. Wencai Z., Xinbo Y., Honaker R. Q. Association characteristic study and preliminary recovery investigation of rare earth elements from Fire Clay seam coal middlings // Fuel. 2018. V. 215. P. 551-560. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.11.075.
32. Wencai Z., Honaker R. Calcination pretreatment effects on acid leaching characteristics of rare earth elements from middlings and coarse refuse material associated with a bituminous coal source // Fuel. 2019. V. 249. P. 130-145. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.03.063.
33. Taggarta R. K., Howerb J. C., Hsu-Kima H. Effects of roasting additives and leaching parameters on the extraction of rare earth elements from coal fly ash // International Journal of Coal Geology. 2018. V. 196. P. 106-114. DOI: 10.1016/j.coal.2018.06.021.



34. Ronghong L., Howard B. H., Roth E. A., Bank T. L., Granite E. J., Yee S. Enrichment of rare earth elements from coal and coal by-products by physical separations // *Fuel*. 2017. V. 200. P. 506-520. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.03.096.
35. Laudala D. A., Benson S. A., Addleman R. S., Palo D. Leaching behavior of rare earth elements in Fort Union lignite coals of North America // *International Journal of Coal Geology*. 2018. V. 191. P. 112-124. DOI: 10.1016/j.coal.2018.03.010.
36. Wencai Z., Noble A., Xinbo Y., Honaker R. A Comprehensive Review of Rare Earth Elements Recovery from Coal-Related Materials // *Minerals*. 2020. V. 10. P. 451. DOI: 10.3390/min10050451.
37. Ronghong L., Mengling S., Howard B. H., Bank T. L., Roth E. A., Macalaa M. K., Lopanoa C., Yee S., Granite E. J. Application of sequential extraction and hydrothermal treatment for characterization and enrichment of rare earth elements from coal fly ash // *Fuel*. 2018. V. 232. P. 124-133. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.05.141.
38. Mostajeran M., Bondy J. M., Reynier N., Cameron R. Mining value from waste: Scandium and rare earth elements selective recovery from coal fly ash leach solutions // *Minerals Engineering*. 2021. V. 173. P. 107091. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107091.
39. Mondala S., Gharb A., Satpatic A.K., Sinharoyd P., Singha D.K., Sharmad J.N., Sreenivasa T., Kain V. Recovery of rare earth elements from coal fly ash using TEHDGA impregnated resin // *Hydrometallurgy*. 2019. V. 185. P. 93-101. DOI: 10.1016/j.hydromet.2019.02.005.
40. Эпштейн С.А., Шинкин В.К. Показатели качества углей для разных направлений использования // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022. № 4. С. 5-16. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_4\_0\_5.
41. Dodbiba, G.; Fujita, T. Trends in Extraction of Rare Earth Elements from Coal Ashes: A Review // *Recycling*. 2023. V. 8. P. 17. DOI: 10.3390/recycling8010017.



# DISTRIBUTION OF CHEMICAL ELEMENTS IN GRANULOMETRIC FRACTIONS OF COAL PREPARATION WASTE OF BEREZOVSKAYA JSC CPP

Tatiana G. Cherkasova, Denis A. Barantsev

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University



## Article info

Received:  
15 September 2023

Revised:  
26 November 2023

Accepted:  
04 December 2023

**Keywords:** waste from coal mining; coal preparation and coal refining; ash slags; elemental, spectrochemical, radiographic, granulometric analysis; concentration; germanium; rare earth elements

## Abstract.

The influence of such factors as high requirements for the quality of coal on the world market, sanctions pressure, the transition to «green energy», the formation of large volumes of waste from the coal industry and anthropogenic pressure on the environment require domestic coal industry enterprises to introduce new technologies that reduce production costs and allow organizing the production of coal processing, as well as waste into products high repartitions. In this regard, the technologies of complex processing of coal mining and coal refining waste in order to extract valuable components, such as rare and rare earth elements (REE), have the greatest potential. In this regard, an important role in the selection of possible ways of waste processing is played by knowledge of the elemental and mineralogical compositions of the raw materials. This paper presents the results of granulometric analysis of flotation and industrial product samples taken from various stages of the coal enrichment process line of the enterprise of JSC CPP «Berezovskaya», urban village. Berezovsky. The content of rock-forming oxides and the elemental, phase compositions of each fraction are determined. Based on the data obtained, a conclusion was made about the efficiency of sieving in order to obtain coal concentrate with an ash content of 33.4% by weight, as well as fractions with an increased content of total REE and germanium concentrate.

---

**For citation** Cherkasova T.G, Barantsev D.A. (2023) Distribution of chemical elements in granulometric fractions of coal preparation waste of Berezovskaya JSC CPP, *Journal of mining and geotechnical engineering*, 4(23):26. DOI: 10.26730/2618-7434-2023-4-26-40, EDN: ZOWFQC

---

## References

1. Plakitkin Yu.A, Plakitkina L.S, D'yachenko K.I. Razvitiye ugol'noy otrasli pod vozdeystviem tendentsiy «zelenoy» energetiki i sanktsionnykh ogranicheniy // *Ugol'*. 2023. № 8. S. 66-72. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-8-66-72.
2. Plakitkin Yu.A., Plakitkina L.S. Pyat' bazovykh zakonomernostey global'noy energetiki, «Zelenaya sdelka» kak sderzhivayushchie faktory razvitiya gornodobyvayushchikh otrasley TEK // *Gornaya promyshlennost'*. 2021. № 4. S. 94-100. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-94-100.
3. Efimov V.I., Nikulin I.B., Rybak V.L. Ispol'zovanie otkhodov ugleobogashcheniya i optimizatsiya resursov po ekologicheskomu faktoru // *Izvestiya TulGU. Nauki o zemle*. 2014. Vyp. 1. S. 85-95.
4. Cherkasova T.G., Cherkasova E.V., Tikhomirova A.V., Pilin M.O., Barantsev D.A. Analiz otkhodov ugle dobychi, uglepererabotki i ugleobogashcheniya mestorozhdeniy Kuznetskogo ugol'nogo basseyna // *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2022. № 6(154). C. 59-66. DOI: 10.26730/1999-4125-2022-6-59-66.
5. Filho W.L., Kotter R., Özuyar P.G., Abubakar I.R., Matandirotya N.R. Understanding Rare Earth Elements as Critical Raw Materials // *Sustainability*. 2023. V. 15. C. 1919. DOI: 10.3390/su15031919.
6. Buravchuk N.I., Gur'yanova O.V. Ispol'zovanie tekhnogennogo syr'ya v proizvodstve nerudnykh stroitel'nykh materialov // *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki*. 2015. № 1. C. 111-117. DOI: 10.17213/0321-2653-2015-1-111-117.
7. Kara-sal B.K., Chyudyuk S.A. Vskryshnye porody ugle dobychi – perspektivnoe syr'e dlya proizvodstva stroitel'nykh materialov // *Vestnik. Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki*. 2017. № 3. s. 98-103.
8. Abdrakhimova E.S. Ispol'zovanie otkhodov ugleobogashcheniya i mezhslyantsevoy gliny v proizvodstve keramicheskogo kirpicha // *Ugol'*. 2021. № 7. S. 52-55. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-7-52-55.



9. Talpa B.V. Tekhnogennye resursy ugol'nogo ryada Vostochnogo Donbassa i perspektivy ikh ispol'zovaniya v keramicheskoy promyshlennosti // Stroitel'nye materialy. 2018. № 8. S. 58–61. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-58-61.
10. Tang Van Lam, Bulgakov B. I., Aleksandrova O. V., Larsen O. A., Shuvalova E. A., Dao V'et Doan. Ispol'zovanie otkhodov ugleobogashcheniya s tsel'yu polucheniya syr'ya dlya proizvodstva stenovogo keramicheskogo kirpicha // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova. 2017. Tom 2. № 8. S. 12-19. DOI: 10.12737/article\_5968b44f705728.90480434.
11. Khyamyalyaynen V.A., Baev M.A. Eksperimental'nye issledovaniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv tamponazhnykh rastvorov na osnove tsementa i otkhodov ugleobogashcheniya // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2013. № 6(100). С. 12-19.
12. Khudyakova L.I., Zalutskiy A.V., Paleev P.L. Ispol'zovanie zoloshlakovykh otkhodov teplovykh elektrostantsiy // XXI VEK. Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2019. № 4(3). S. 290-306. DOI: 10.21285/2500-1582-2019-3-375-391.
13. Murko V.I., Baranova M.P. Obosnovanie innovatsionnykh napravleniy ispol'zovaniya produktov obogashcheniya uglya // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2022. № 6. S. 131-141. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_6\_0\_131.
14. Obosnovanie tekhnologicheskikh resheniy po pererabotke tonkikh ugol'nykh shlamov na obogatitel'nykh fabrikakh AO «UK «Kuzbassrazrezugol'» / V.I. Murko, A.I. Papchenkov, K.A. Golubin i dr. // Ugol'. 2022. № 7. S. 27-33. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-7-27-33.
15. Budaev S. S., Nifontov Yu. A., Razrabotka novoy tekhnologii briketirovaniya ugol'nykh shlamov Pechorskogo basseyna // Nauchno-tekhnicheskii vestnik IOTT, Lyubertsy. 1997. № 7. S. 4.
16. Blayda I.A., Vasil'eva T.V., Baranov V.I., Slyusarenko L.I., Baklan V.Yu. Vozmozhnosti bakterial'nogo i khimicheskogo vyshchelachivaniya otkhodov ugleobogashcheniya s tsel'yu izvlecheniya germaniya i galliya // Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya. 2013. № 1(4). С. 54-60.
17. Obrabotka ugol'noy zoly predpriyatiy energetiki v protsessakh bakterial'nogo vyshchelachivaniya redkozemel'nykh metallov / Ksenofontov B. S., Kozodaev A. S., Taranov R. A., Balina A. A., Vinogradov M. S., Petrova E. V. // Bezopasnost' v tekhnosfere. 2013. № 4. S. 17-22.
18. Patent RF № RU2657149C1, 08.06.2018. Sposob izvlecheniya redkozemel'nykh metallov i skandiya iz zoloshlakovykh otkhodov // Patent Rossii № 2657149. 2018. Byul. № 16. / Kol'tsov V. Yu. [i dr.].
19. Patent RF № RU2293134C1, 10.02.2007. Sposob izvlecheniya redkozemel'nykh metallov i ittriya iz ugley i zoloshlakovykh otkhodov ot ikh szhiganiya // Patent Rossii № 2293134. 2007. Byul. № 4. / Kuz'min V. I. [i dr.].
20. Valeev D. V., Varnavskaya A. D. Izuchenie sposobov obogashcheniya i solyanokislotnoe vyshchelachivanie zol ugol'nykh elektrostantsiy // Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. 2019. № 3. S. 37-44. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.1.37-43.
21. Ksenofontov B. S., Kozodaev A. S., Taranov R. A., Senik E. V., Vinogradov M. S., Voropaeva A. A. Vyshchelachivanie redkozemel'nykh metallov iz ugol'noy zoly i ikh kontsentrirovanie // Bezopasnost' v tekhnosfere. 2016. № 1. S.48-54. DOI: 10.12737/19023.
22. Entsiklopediya tekhnologiy. Evolyutsiya i sravnitel'nyy analiz resursnoy effektivnosti promyshlennykh tekhnologiy / [gl. red. D.O. Skobelev]; FGAU «NII «TsEPP». – M.; SPb.: «Renome», 2019.– 824 s.: il.
23. Cherepanov A.A., Kardash V.T. Kompleksnaya pererabotka zoloshlakovykh otkhodov TETs (rezul'taty laboratornykh i polupromyshlennykh ispytaniy) // Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana. 2009. № 2. S. 98-115.
24. Balbekova B. K., Taubaeva Sh. M. Issledovanie vozmozhnosti izvlecheniya RZE iz zoloshlakovykh otkhodov Karagandinskoy TETs // Nauka i tekhnika Kazakhstana. 2020. № 2. S. 82-87.
25. Dismukhamedov N.K., Kaplan V.A., Daruesh G.S. Innovatsionnaya tekhnologiya kompleksnoy pererabotki zoly ot szhiganiya uglya // Ugol'. 2020. № 1. S. 58-63. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-1-58-63.
26. Vydelenie zheleza v zhelezosoderzhashchiy produkt iz zoly ot szhiganiya Ekibastuzskikh ugley / N.K. Dismukhamedov, V.A. Kaplan, E.E. Zholdasbay i dr. // Ugol'. 2021. № 1. S. 56-61. DOI: 10.18796/0041-5790-2021- 1-56-61.
27. Razrabotka tekhnologicheskoy skhemy briketirovaniya otkhodov flotatsii / T.I. Chernyshova, E.P. Naboko, N.V. Alpatov // Nauka i sovremennost'. 2015. № 36. S. 128-132.
28. Yaguang Z., Guangcheng W., Young-Shin J. Supercritical carbon dioxide/nitrogen/air extraction with multistage stripping enables selective recovery of rare earth elements from coal fly ashes // RSC Sustainability. 2023. V. 1. P. 251-260. DOI: 10.1039/d2su00033d.
29. An investigation into six coal fly ashes from the United Kingdom and Poland to evaluate rare earth element content / R.S. Blissett, N. Smalley, N.A. Rowson // Fuel. 2014. V. 119. P. 236-239. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.11.053.



30. Kinga J. F., Taggart R. K., Smitha R. C., Howerb J. C., Hsu-Kima H. Aqueous acid and alkaline extraction of rare earth elements from coal combustion ash *International Journal of Coal // Geology*. 2018. V. 195. R. 75-83. DOI: 10.1016/j.coal.2018.05.009.
31. Wencai Z., Xinbo Y., Honaker R. Q. Association characteristic study and preliminary recovery investigation of rare earth elements from Fire Clay seam coal middlings // *Fuel*. 2018. V. 215. R. 551-560. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.11.075.
32. Wencai Z., Honaker R. Calcination pretreatment effects on acid leaching characteristics of rare earth elements from middlings and coarse refuse material associated with a bituminous coal source // *Fuel*. 2019. V. 249. P. 130-145. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.03.063.
33. Taggart R. K., Howerb J. C., Hsu-Kima H. Effects of roasting additives and leaching parameters on the extraction of rare earth elements from coal fly ash // *International Journal of Coal Geology*. 2018. V. 196. P. 106-114. DOI: 10.1016/j.coal.2018.06.021.
34. Ronghong L., Howard B. H., Roth E. A., Bank T. L., Granite E. J., Yee S. Enrichment of rare earth elements from coal and coal by-products by physical separations // *Fuel*. 2017. V. 200. R. 506-520. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.03.096.
35. Laudala D. A., Benson S. A., Addleman R. S., Palo D. Leaching behavior of rare earth elements in Fort Union lignite coals of North America // *International Journal of Coal Geology*. 2018. V. 191. R. 112-124. DOI: 10.1016/j.coal.2018.03.010.
36. Wencai Z., Noble A., Xinbo Y., Honaker R. A Comprehensive Review of Rare Earth Elements Recovery from Coal-Related Materials // *Minerals*. 2020. V. 10. P. 451. DOI: 10.3390/min10050451.
37. Ronghong L., Mengling S., Howard B. H., Bank T. L., Roth E. A., Macalaa M. K., Lopanoa C., Yee S., Granite E. J. Application of sequential extraction and hydrothermal treatment for characterization and enrichment of rare earth elements from coal fly ash // *Fuel*. 2018. V. 232. R. 124-133. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.05.141.
38. Mostajeran M., Bondy J. M., Reynier N., Cameron R. Mining value from waste: Scandium and rare earth elements selective recovery from coal fly ash leach solutions // *Minerals Engineering*. 2021. V. 173. P. 107091. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107091.
39. Mondala S., Gharb A., Satpatic A.K., Sinharoyd P., Singha D.K., Sharmad J.N., Sreenivasa T., Kain V. Recovery of rare earth elements from coal fly ash using TEHDGA impregnated resin // *Hydrometallurgy*. 2019. V. 185. P. 93-101. DOI: 10.1016/j.hydromet.2019.02.005.
40. Epshteyn S.A., Shinkin V.K. Pokazateli kachestva ugley dlya raznykh napravleniy ispol'zovaniya // *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2022. № 4. S. 5-16. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_4\_0\_5.
41. Dodbiba, G., Fujita, T. Trends in Extraction of Rare Earth Elements from Coal Ashes: A Review // *Recycling*. 2023. V. 8. R. 17. DOI: 10.3390/recycling8010017.

### Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### Information about the authors

**Tatiana G. Cherkasova**, Dr.Sc. (Chem.), Professor, Director of the Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University  
e-mail: ctg.htnv@kuzstu.ru

**Denis A. Barantsev**, Assistant of the Department of Chemistry, Technology of Inorganic Substances and Nanomaterials of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University  
e-mail: kemche@yandex.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University  
28, Vesennaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation.

