

УДК 550.4.02 + 502.42 + 504.54.062.4

МОБИЛЬНОСТЬ МАКРО- И МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ОТХОДАХ ДОБЫЧИ УГЛЕЙ

© 2023 г. Хао Цзе^{1,*}, Е. М. Кочеткова^{1,**}, С. А. Эпштейн^{1,***}

¹ФГАОУ ВО Национальный исследовательский технологический университет “МИСИС”
(ФГАОУ ВО НИТУ “МИСИС”), 119049 Москва, Россия

*e-mail: haoj1127@yandex.ru

**e-mail: lizavetakochetkova@mail.ru

***e-mail: apshtein@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.03.2023 г.

После доработки 05.04.2023 г.

Принята к публикации 11.04.2023 г.

Рассмотрены отечественные и зарубежные статические тесты для оценки воздействия минеральных отходов добычи и переработки углей на водные объекты при размещении отходов в отвалах или использовании в целях рекультивации. Приведены результаты статических тестов по ГОСТ Р 58914–2020 для трех проб минеральных отходов, отобранных на месторождениях каменного и бурого углей. Представленные отходы существенно различаются по минеральному и химическому составу, в том числе по содержанию серы. Показано, что высокое содержание в отходе серы, в том числе в водорастворимой форме, определяет низкое значение pH водной вытяжки. Это, в свою очередь, приводит к увеличению выхода водорастворимых веществ и повышению мобильности макро- и микроэлементов.

Ключевые слова: уголь, выщелачивание, отходы добычи углей, макро- и микроэлементы, оценка воздействия на окружающую среду, мобильность, водорастворимые формы

DOI: 10.31857/S0023117723040047, EDN: OMJQGW

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении многих лет уголь остается востребованным энергоносителем. Согласно отчетам, опубликованным на сайте *International Energy Agency (IEA)* [1, 2], мировое потребление угля в 2021 г. составило 7929 млн т, из которых 5735 млн т было направлено на угольную генерацию. По данным, представленным на сайте Министерства энергетики Российской Федерации [3], в 2021 г. в стране было добыто 438.4 млн т углей. Негативной стороной высокого спроса на уголь является образование большого числа отходов. В 2017 г. в результате добычи углей было образовано 3598 млн т отходов, из которых 1892 млн т было размещено во внешних отвалах [4]. Сохранение и увеличение темпов добычи углей приводит к росту количества минеральных отходов добычи и переработки, что в свою очередь приводит к деградации существующего почвенно-растительного покрова, нарушению целостности естественных ландшафтов и сельскохозяйственных угодий, а также химическому загрязнению грунтовых вод и почвы [5, 6].

Воздействие минеральных отходов на состояние поверхностных и подземных вод определяет-

ся мобильностью входящих в состав отходов макро- и микроэлементов, т.е. их способностью переходить в водорастворимые формы при контакте с водой. Процессы вымывания из отходов макро- и микроэлементов часто называют выщелачиванием.

Изучению механизмов выщелачивания отходов добычи углей посвящено большое количество исследований. В работах [7–9] показано, что воздействие климатических и техногенных факторов может привести к миграции таких элементов, как Cd, Co, Mg, Mn, Ni, Pb, S и Zn из толщи отходов и увеличению степени химического загрязнения почв и грунтовых вод районов добычи углей. Наличие окислительной атмосферы и влаги закономерно приводит к изменению состава отходов и переходу потенциально опасных соединений в водорастворимую форму [10–12].

Для прогнозирования поведения отходов в части их возможного выщелачивания используют статические тесты, отличающиеся экспрессностью и простотой выполнения [7]. Суть статических тестов заключается в одноступенчатой статической экстракции исследуемого образца фиксированным объемом элюента, как правило

воды, и последующей оценке риска перехода потенциально опасных соединений в водорастворимую форму [13, 14].

В Российской Федерации для проведения статических тестов отходов добычи, переработки и сжигания углей разработан ГОСТ Р 58914–2020 “Топливо твердое минеральное. Определение выхода и состава водорастворимых форм веществ”. В зарубежной практике наибольшее распространение получили европейские и американские стандарты, подробно рассмотренные в работе [13].

Наиболее полно оценить риск миграции в водные объекты экологически значимых элементов, содержащихся в отходах добычи и переработки углей, позволяют тесты, основанные на многоступенчатой экстракции. В таких тестах в качестве элюента используется широкий диапазон реагентов, что позволяет точно установить условия, при которых концентрация выделившихся элементов будет наибольшей [11, 15, 16].

В статических тестах риски миграции потенциально опасных макро- и микроэлементов в окружающую среду оценивают на основе сопоставления концентраций элементов, выделившихся в результате экстракции, с предельно допустимыми концентрациями, установленными в различных санитарно-гигиенических стандартах [14]. В Российской Федерации при оценке воздействия отходов на окружающую среду определяют водно-миграционный показатель (СП 2.1.7.1386-03 Санитарные правила по определению класса опасности токсичных отходов производства и потребления), который рассчитывают как отношение концентрации i -го элемента в водной вытяжке к их предельно допустимой концентрации (ПДК) в водах определенного назначения. Значение полученного ориентировочного водно-миграционного показателя (ОВМП_Е) для отдельных элементов используют для оценки класса опасности отходов с точки зрения их влияния на поверхностные и подземные воды.

В статье рассмотрены результаты статического теста по ГОСТ Р 58914–2020 для трех отходов добычи каменного и бурого углей, существенно различающихся по минеральному и химическому составу. На основании результатов исследования выявлены потенциальные загрязнители водных объектов при размещении таких отходов в отвалах и использовании для рекультивации.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пробы пород были отобраны на двух угольных месторождениях открытой добычи углей. Пробы У1 и У2 были отобраны на Березовском месторождении бурого угля Канско-Ачинского бассейна. Пробу У1 отбирали от подстилающей уголь-

ный пласт породы. Породы вскрыши на Березовском месторождении отбирали по всей мощности на пяти отдельных вскрышных уступах. Для исследования использовали вскрышную породу, отобранную на пятом (нижнем) уступе. Выбор этой пробы для исследования был обоснован результатами предварительного опробования по содержанию в пробах серы. Отбор проб производили от предварительно зачищенной поверхности.

Проба У3 была отобрана после буровзрывных работ по вскрыше на Ургальском угольном месторождении Буреинского бассейна.

Отобранные пробы отходов (крупностью менее 3 мм) были помещены в герметичную тару, исключаящую их окисление при хранении. Для проведения исследований пробы были доведены до воздушно-сухого состояния, после чего измельчены до аналитической крупности менее 0.2 мм.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Определение минерального и элементного состава исследуемых проб. Минеральный состав исследуемых проб и их элементный состав по основным золообразующим элементам определяли методами рентгеновского дифракционного и рентгенофлуоресцентного анализа. Измерения проводили на аналитическом комплексе *ARL 9900 Workstation IP3600*, в котором реализована комбинированная конструкция “рентгенофлуоресцентный спектрометр с верхним расположением трубки + θ – θ дифрактометр”. Идентификацию минеральных фаз выполняли с использованием базы данных *ICDD PDF-2* и программного пакета *Crystallographica Search-Match*. Долю рентгеноаморфных минеральных фаз рассчитывали как разность между исходной площадью дифрактограммы и площадью реконструированной дифрактограммы всех кристаллических фаз. Для исследований пробы отходов дополнительно измельчали до крупности менее 63 мкм. Измерения проводили на исходных пробах отходов, без их предварительного озоления.

Дополнительно в пробах отходов определяли содержание органического углерода ($C_{\text{орг}}$) по РД 34.09.603–88 “Методические указания по организации контроля состава и свойств золы и шлаков, отпускаемых потребителям тепловыми электростанциями”. Суть метода заключается в проведении последовательных стадий деминерализации пробы соляной кислотой, высушивании при $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ и прокаливании при $(815 \pm 10)^\circ\text{C}$ отфильтрованного остатка до постоянной массы.

Для определения в отходах содержания фтора, хлора, ртути, серы использовали пробы аналитической крупности (менее 0.2 мм). Пробы перед анализом кондиционировали на воздухе до воздушно-сухого состояния. Для определения в от-

ходах содержания влаги (W , %) представительную часть воздушно-сухой пробы (ориентировочно 1 г), взвешивали с точностью до 0.0001 г в предварительно взвешенном бюксе, и помещали в сушильный шкаф, нагретый до температуры 105–110°C. Фиксировали изменение массы пробы каждый час до ее стабилизации. Полученное значение содержания влаги использовали для пересчета содержания элементов на сухое состояние проб отходов. Содержание в отходах серы определяли аналогично ГОСТ 32465–2013 (ISO 19579:2006) “Топливо твердое минеральное. Определение серы с использованием ИК-спектроскопии”; фтора аналогично инструкции НСАМ 188-Х, 189-Х “Ионометрическое определение фтора в минеральном сырье”; хлора по ГОСТ Р 59013 “Топливо твердое минеральное. Определение содержания хлора”; ртути – по ГОСТ Р 59176 “Топливо твердое минеральное. Определение содержания ртути на основе прямого сжигания”.

Для определения других элементов пробу аналитической крупности подвергали озолению в муфельной печи *SNOL 7.2/900* при $(500 \pm 10)^\circ\text{C}$ по следующей схеме: пробу в предварительно взвешенном тигле помещали в муфельную печь при комнатной температуре, после чего ее равномерно повышали до 500°C в течение 60 мин. Обработку заканчивали по результатам определения массы пробы после ее полной стабилизации.

Определяли остаток после озоления пробы (A_{500}^d , %) с учетом содержания в ней влаги.

Расчет показателя (A_{500}^d) производили по формуле:

$$A_{500}^d = \left(\frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \right) \left(\frac{100}{100 - W} \right),$$

где m_1 – масса пустого тигля, г; m_2 – масса тигля с навеской пробы, г; m_3 – масса тигля с озоленной пробой, г; W – содержание в пробе влаги, %.

После озоления пробу переводили в раствор путем обработки смесью плавиковой, азотной и соляной кислот. В полученном растворе определяли концентрацию элементов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (*ICP-AES*) на приборе *ICAP 7200 Thermo* с аксиальным обзором плазмы. Полученные значения пересчитывали на сухое состояние отходов с учетом величины A_{500}^d .

Определение выхода и состава водорастворимых форм веществ в отходах. Выход водорастворимых форм веществ из отходов и содержание макро- и микроэлементов в полученных водных вытяжках определяли по ГОСТ Р 58914–2020. Суть метода заключается в экстракции пробы бидистиллированной водой при соотношении твердого вещества к жидкому 1 : 50 и последующем определе-

нии в полученной водной вытяжке концентрации водорастворимых форм макро- и микроэлементов. Выход водорастворимых веществ определяли по массе сухого остатка, полученного после упаривания аликвоты водной вытяжки. Концентрацию макро- и микроэлементов в водной вытяжке определяли на отдельных аликвотах в соответствии с рекомендациями ГОСТ Р 58914–2020: фтор – ПНД Ф 14.1:2:3.173-2000 “Методика выполнения измерений массовой концентрации фторид-ионов в сточных, природных поверхностных и подземных водах потенциометрическим методом”; остальные элементы методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (*ICP-AES*) на приборе *ICAP 7200 Thermo*.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Минеральный и химический состав исследуемых проб. В табл. 1–3 представлены результаты определения минерального и химического состава исследуемых проб.

Исследуемые отходы существенно различаются по минеральному составу (табл. 1). В составе пробы У1 преобладают кварц и алюмосиликаты, суммарное содержание которых составляет 78%. Минеральный состав пробы У2 более разнообразен: в нем помимо алюмосиликатов и кварца (суммарно – 65%) присутствуют железо- и серосодержащие минералы в виде гипса и ярозита. Состав пробы У3 существенно отличается от У1 и У2. В этой пробе наряду с кварцем и алюмосиликатами (суммарно – 70%) присутствуют карбонатные породы в виде доломита и сидерита. Наибольшее содержание рентгеноаморфной минеральной фазы обнаружено в составе пробы У2, наименьшее – в У1.

Результаты РФА и *ICP-AES* (табл. 2) показали, что выбранные для исследования пробы различаются по содержанию основных золообразующих элементов. Проба У1 характеризуется наибольшим содержанием алюминия и титана, а также минимальным содержанием кальция, железа, калия, магния, натрия, фосфора, кремния и серы. Содержание в отходах кремния в целом сопоставимо и находится в диапазоне от 28.6 до 31.06%. Проба У2, имеющая наиболее разнообразный минеральный состав, характеризуется максимальным содержанием кальция, железа, магния, фосфора и серы (1.6%), а также минимальным содержанием алюминия. Вскрышная порода У3 характеризуется наибольшим содержанием кремния, натрия и калия. Повышенное содержание в пробе У3 натрия и калия обусловлено, по всей видимости, наличием в ее составе значительного количества альбита и ортоклаза. Содержание ор-

Таблица 1. Результаты рентгеновского дифракционного анализа исследуемых проб

№ пробы	Фаза	Состав	Массовая доля, %
У1	Кварц	SiO ₂	41.02
	Мусковит	KAl ₂ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	4.68
	Каолинит	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	32.33
	Рентгеноаморфная минеральная фаза	—	21.97
У2	Кварц	SiO ₂	37.79
	Альбит	NaAlSi ₃ O ₈	8.20
	Мусковит	KAl ₂ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	4.94
	Ортоклаз	KAlSi ₃ O ₈	2.39
	Каолинит	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	11.94
	Гипс	CaSO ₄ (H ₂ O) ₂	3.69
	Ярозит	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	1.00
	Рентгеноаморфная минеральная фаза	—	30.04
У3	Кварц	SiO ₂	36.47
	Альбит	NaAlSi ₃ O ₈	18.14
	Доломит	CaMg(CO ₃) ₂	2.59
	Мусковит	KAl ₂ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	5.25
	Ортоклаз	KAlSi ₃ O ₈	6.08
	Каолинит	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	3.95
	Сидерит	FeCO ₃	2.41
	Рентгеноаморфная минеральная фаза	—	25.11

ганического углерода (C_{орг}) в пробах находится в диапазоне 2.4–5.8%.

В табл. 3 представлены результаты определения валового содержания в отходах микроэлементов.

Содержание в исследуемых пробах основных микроэлементов в целом соответствует значениям кларков этих элементов в верхней части земной коры [17, 18]. В пробе У2 отмечено превышение содержания лития, фтора и мышьяка относительно соответствующих кларков.

Состав пробы У2 отличается более высоким содержанием таких элементов, как мышьяк, барий, хром, фтор, хлор, литий, никель, стронций и цинк по сравнению с пробами У1 и У3. В пробе У3 отмечено минимальное содержание диагностируемых элементов, а проба У1 отличается более высоким содержанием меди по сравнению с остальными отходами.

Выход и состав водорастворимых форм веществ из отходов. На рис. 1, 2 представлены результаты определения выхода водорастворимых форм веществ из отходов и значения pH водной вытяжки, полученной в соответствии с ГОСТ Р 58914–2020. Пробы У1 и У3 отличаются достаточно низким содержанием в своем составе водорастворимых форм веществ (0.3 и 0.1% соответственно), в то время как соответствующий показатель для пробы У2 составил 4.3%. Показатель кислотности pH для водных вытяжек из проб У1 и У3 близок к нейтральной среде, а для водной вытяжки из пробы отхода У2 pH составляет 3.6 ед., что обусловлено, по всей видимости, высоким содержанием общей серы и ее водорастворимой формы в пробе (табл. 4).

В табл. 4 представлены данные о содержании в исследуемых отходах водорастворимых форм макро- и микроэлементов. Данные, приведенные в табл. 4, рассчитывали на основании результатов

Таблица 2. Содержание в пробах золообразующих элементов по результатам рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) и ICP-AES

Элемент	№ пробы		
	У1	У2	У3
Содержание элементов в пробах отходов, %			
Na	0.06 (0.06)	0.49 (0.71)	1.25 (1.2)
Mg	0.31 (0.25)	0.94 (0.67)	0.58 (0.41)
Al	13.10 (11.3)	7.94 (6.1)	10.00 (6.3)
Si	28.60	29.40	31.06
P	0.02 (0.01)	0.32 (0.30)	0.04 (0.04)
S	0.15 (0.03)	1.56 (1.6)	0.35 (0.04)
K	1.41 (1.5)	2.07 (2.1)	3.43 (2.7)
Ca	0.15 (0.14)	1.62 (1.0)	1.09 (0.58)
Ti	0.67 (0.73)	0.61 (0.59)	0.33 (0.25)
Mn	0.02 (0.01)	0.05 (0.03)	0.03 (0.03)
Fe	0.72 (0.60)	4.33 (3.9)	2.04 (1.6)
Дополнительные характеристики проб			
$C_{\text{орг}}$	4.4	2.4	5.8
A_{500}^d	92.6	93.4	92.3
W	1.3	5.0	0.9

Примечание. В скобках указано содержание элементов (на сухое состояние), определенное методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES), а также содержание серы (на сухое состояние), определенное по ГОСТ 32465–2013.

определения концентраций макро- и микроэлементов (в мг/дм³) в водных вытяжках (табл. 5). Содержание водорастворимой формы элемента в водной вытяжке (в мкг/г) рассчитывали по формуле:

$$\frac{CV}{m} \times 1000,$$

где C — измеренная концентрация элемента в водной вытяжке, мг/дм³; V — объем водной вытяжки, дм³; m — масса пробы, взятой для анализа, в пересчете на сухое состояние, г; 1000 — пересчет мг в мкг.

В настоящей работе масса пробы (m) составляла 10 г, а объем водной вытяжки (V) — 0.5 дм³.

Массовую долю водорастворимой формы элемента в пробе отходов рассчитывали по формуле:

$$\frac{X_{\text{вр}}}{X_{\text{общ}}} \times 100,$$

Таблица 3. Содержание микроэлементов в пробах

Элемент	Содержание элементов (мкг/г) в пробах			Кларки химических элементов в верхней части континентальной земной коры, мкг/г [17, 18]
	У1	У2	У3	
Li	<5.5	135	40	5–56
Be	1.1	1.6	2.4	1.3–3.8
B	31	29	7.6	9.2–47
F	333	1061	441	500–720
Cl	122	160	13	100–1500
V	63	98	44	53–121
Cr	41	66	29	34–92
Ni	4.3	29	9.6	18.6–50
Cu	39	26	13	14–47
Zn	12	80	75	51–83
Ga	23	12	15	4–19
As	1.7	18	8.2	1.5–11
Sr	59	167	112	230–350
Mo	<1.7	1.3	1.3	0.6–1.56
Cd	<0.12	0.54	0.39	0.06–0.64
Ba	39	52	11	510–1070

где $X_{\text{вр}}$ — содержание водорастворимой формы элемента в водной вытяжке, мкг/г; $X_{\text{общ}}$ — общее содержание элемента в пробе отходов, мкг/г.

При расчете массовой доли водорастворимых форм элементов в пробе отходов использовали результаты определения общего содержания элементов в пробе методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES), а общего содержания серы по ГОСТ 32465–2013.

Вскрышная порода У2 отличается наибольшим содержанием водорастворимых форм различных элементов, таких как кальций, магний, стронций, марганец, кобальт и цинк. Несмотря на высокое валовое содержание меди в пробе У1 (39 мкг/г), ее водорастворимая форма составляет 3.0%. При этом в пробе У2 содержание водорастворимой формы меди составляет 18.9%.

Высокое содержание в составе пробы У2 водорастворимых форм элементов обусловлено в первую очередь низким значением pH водной

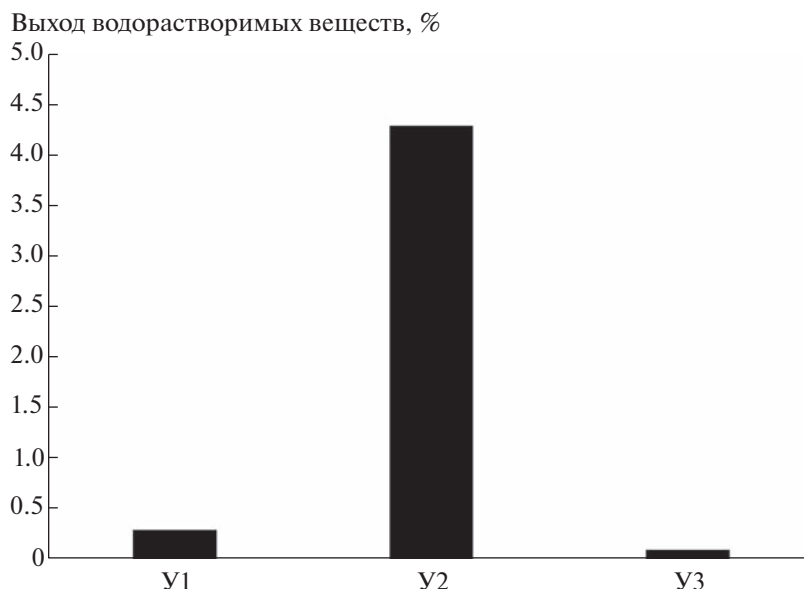


Рис. 1. Выход водорастворимых веществ из отходов.

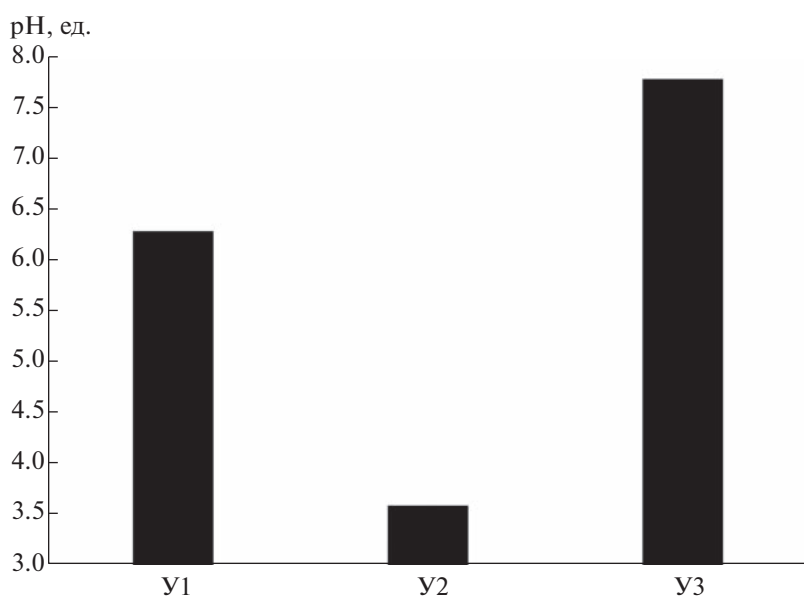


Рис. 2. pH водной вытяжки из отходов.

вытяжки из этого отхода. Хорошо известно, что потенциал выщелачивания макро- и микроэлементов, в том числе потенциально опасных, в значительной степени зависит от значения pH: чем выше кислотность водной вытяжки, тем больше вероятность повышения мобильности водорастворимых форм элементов [16, 19].

Проба У1 отличается высоким содержанием водорастворимого натрия. Для пробы У3 характерно более высокое, чем в пробах У1 и У2 содержание водорастворимых форм молибдена и ба-

рия, содержание остальных элементов составляет не более 2% от их валового содержания в отходе.

Полученные данные позволяют оценить потенциальные загрязнители в каждом из представленных отходов. В табл. 5 показаны концентрации элементов в водных вытяжках и показатели ОВМП_Е по отдельным элементам.

Результаты, представленные в табл. 5, показывают, что потенциальным загрязнителем водных объектов для отхода У1 является медь, ОВМП_Е которой составляет 23.0 ед. Все остальные эле-

Таблица 4. Содержание водорастворимых форм макро- и микроэлементов в водной вытяжке (мкг/г) и их массовая доля (%) от общего содержания в отходах

Элемент	№ пробы					
	У1		У2		У3	
	содержание водорастворимой формы					
	в водной вытяжке, мкг/г	от общего содержания в отходах, %	в водной вытяжке, мкг/г	от общего содержания в отходах, %	в водной вытяжке, мкг/г	от общего содержания в отходах, %
Li	<0.12	<2.2	2.1	1.5	<0.17	<0.4
Na	91	16.5	20	0.3	19	0.2
Mg	30	1.2	918	13.7	82	2.0
Al	25	0.02	592	1.0	18	0.03
P	0.55	0.4	7.1	0.2	0.01	0.002
S	103	34.5	6077	37.3	8.1	2.0
K	123	0.8	88	0.4	123	0.5
Ca	126	9.3	4251	42.0	285	4.9
Ti	0.92	0.01	<0.31	<0.01	0.22	0.01
V	0.19	0.3	0.05	0.1	0.004	0.01
Cr	0.03	0.1	0.44	0.7	0.01	0.03
Mn	0.24	0.4	160	48.9	0.59	0.2
Fe	4.4	0.1	405	1.0	3.8	0.02
Co	<0.01	<1.0	6.3	39.2	0.01	0.2
Ni	0.06	1.4	12	40.2	0.09	0.9
Cu	1.2	3.0	4.9	18.9	<0.29	<2.3
Zn	1.6	13.5	32	39.5	<2.4	<3.2
As	<0.04	<2.4	0.10	0.6	0.02	0.2
Sr	2.3	3.9	42	25.1	1.9	1.7
Mo	0.02	<1.2	<0.02	<1.5	0.10	7.9
Ba	0.39	1.0	2.9	5.5	0.87	7.9

менты не представляют потенциальной опасности как загрязнители водных объектов.

Для отхода У3 не выявлено явных потенциальных загрязнителей, так как значения ОВМП_Е определяемых элементов менее 5.0 ед., что, в соответствии с СП 2.1.7.1386-03, говорит о безопасности этого отхода для водных объектов.

По сравнению с отходами У1 и У3 вскрышная порода У2 отличается большим количеством потенциальных загрязнителей: ОВМП_Е таких элементов как медь, железо, марганец и цинк составляет 93.2, 77.0, 304.0, 60.1 ед. соответственно.

ВЫВОДЫ

1. Мобильность макро- и микроэлементов в составе минеральных отходов в мировой и отечественной практике оценивают по результатам статических тестов, основанных на определении концентрации элементов в водных вытяжках, выделенных из отходов в различных условиях.

2. Исследованы три пробы минеральных отходов разных угольных месторождений. Показано, что представленные отходы различаются по своему минеральному и химическому составу. Отмечено, что содержание серы в отходах различно и

Таблица 5. Концентрации элементов в водных вытяжках и показатели ОВМП_Е по отдельным элементам

Элемент	№ пробы								
	У1			У2			У3		
	С, мг/дм ³	ПДК, мг/дм ³	ОВМП _Е	С, мг/дм ³	ПДК, мг/дм ³	ОВМП _Е	С, мг/дм ³	ПДК, мг/дм ³	ОВМП _Е
Li	Н.п.о. (<0.002)	0.08	—	0.04	0.08	0.5	Н.п.о. (<0.003)	0.08	—
B	Н.п.о. (<0.09)	0.5	—	0.003	0.5	0.01	0.09	0.5	0.2
Na	1.8	120	0.02	0.38	120	0.003	0.37	120	0.003
Mg	0.60	40	0.01	17	40	0.4	1.6	40	0.04
S	2.0			116			0.16		
S (в пересчете на сульфаты)	6.0	100	0.1	347	100	3.5	0.48	100	0.005
K	2.4	50	0.05	1.7	50	0.03	2.4	50	0.05
Ca	2.5	180	0.01	81	180	0.4	5.7	180	0.03
Ti	0.02	0.06	0.3	Н.п.о. (<0.01)	0.06	—	0.004	0.06	0.1
V	0.004	0.001	3.8	0.001	0.001	1.0	0.0001	0.001	0.1
Mn	0.005	0.01	0.5	3.0	0.01	304.0	0.01	0.01	1.2
Fe	0.09	0.1	0.9	7.7	0.1	77.0	0.08	0.1	0.8
Co	Н.п.о. (<0.0001)	0.01	—	0.12	0.01	11.9	0.0002	0.01	0.02
Ni	0.001	0.01	0.1	0.22	0.01	22.2	0.002	0.01	0.2
Cu	0.02	0.001	23.0	0.09	0.001	93.2	Н.п.о. (<0.01)	0.001	—
Zn	0.03	0.01	3.2	0.60	0.01	60.1	Н.п.о. (<0.05)	0.01	—
As	Н.п.о. (<0.001)	0.05	—	0.002	0.05	0.04	0.0005	0.05	0.01
Sr	0.05	0.4	0.1	0.80	0.4	2.0	0.04	0.4	0.1
Mo	0.0004	0.001	0.4	Н.п.о. (<0.0005)	0.001	—	0.002	0.001	2.0
Ba	0.01	0.74	0.01	0.05	0.74	0.1	0.02	0.74	0.02

Примечание: Показатель С — измеренная концентрация элемента в водной вытяжке; ПДК — предельно допустимая концентрация элемента в водах рыбохозяйственного назначения в соответствии с [20]; ОВМП_Е — ориентировочный водно-миграционный показатель в соответствии с Санитарными правилами СП 2.1.7.1386-03; Н.п.о. — ниже предела определения, в скобках указан предел определения данного элемента; тире — значение близко к нулю.

составляет: 0.15, 0.35 и 1.56% по данным РФА анализа.

3. Установлено, что для отхода с содержанием серы 1.56%, водная вытяжка, полученная по ГОСТ Р 58914—2020, характеризуется значением рН 3.6 ед. Водные вытяжки из отходов с содержанием серы 0.15 и 0.35% характеризуются значениями рН 6.3 и 7.8 ед. соответственно.

4. Выход водорастворимых форм веществ для отхода с низким значением рН водной вытяжки (3.6 ед.) значительно выше, чем для отходов, имеющих водные вытяжки со значениями рН 6.3 и 7.8 ед. Низкое значение рН водной вытяжки определяет высокую мобильность таких элементов, как кобальт, железо, марганец, никель, медь и цинк. Значения ОВМП_Е вышеперечисленных

элементов составляют 11.9, 77.0, 304.0, 22.2, 93.2 и 60.1 ед. соответственно. Для отходов с рН водной вытяжки 6.3 и 7.8 ед. ОВМП_Е этих элементов составляют от 0.02 до 23.0 ед., а в целом по всем элементам не более 23.0 ед.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства “Приоритет 2030”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEA (2021), Coal 2021, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/coal-2021>, License: CC BY 4.0 URL: <https://www.iea.org/reports/coal-2021>
2. IEA (2022), Coal 2022, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/coal-2022>, License: CC BY 4.0 URL: <https://www.iea.org/reports/coal-2022>
3. Добыча угля. Сайт Министерства энергетики РФ. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/435>
4. Силка Д.Н., Аникеев В.В. // Энергетическая политика. 2020. № 1. С. 72.
5. Adibee N., Osanloo M., Rahmanpour M. // Environmental Earth Sci. 2013. № 70. P. 1581. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2243-0>
6. Bian Z., Dong J., Lei S., Leng H., Mu S., Wang H. // Environmental Geology. 2009. № 58. P. 625. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1537-0>
7. Chotpanarat S. // Amer. Appl. Sci. 2011. V. 8. № 4. P. 400.
8. Helser J., Cappuyns V. // Environmental Chem. Enging. 2022. V. 10. № 4. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108158>
9. Chuncai Z., Guijian L., Dun W., Ting F., Ruwei W., Xiang F. // Chemosphere. 2014. V. P. 193. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.08.065>
10. Hilton M., Shaygan M., McIntyre N., Baumgartl T., Edraki M. // Minerals. 2019. V. 12. № 9. P. 760. <https://doi.org/10.3390/min9120760>
11. Ribeiro J., Flores D. // Energy Geoscience. 2021. V. 2. № 2. P. 121. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.09.005>
12. Welch C., Barbour S.L., Hendry M.J. // Sci. Total Environment. 2021. V. 795. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148798>
13. Силютин С.А., Эпштейн С.А., Гущина Т.О. // ГИАБ. 2020. №5. С. 5. [Silyutin S.A., Epshtein S.A., Gushchina T.O. // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2020. № 5. P. 5. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-5-0-5-16> <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-5-0-5-16>
14. Гущина Т.О., Силютин С.А., Соколовская Е.Е., Эпштейн С.А. // ГИАБ. 2020. № 8. С. 145. [Gushchina T.O., Silyutin S.A., Sokolovskaya E.E., Epshtein S.A. // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2020. № 8. P. 145. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-8-0-145-162> <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-8-0-145-162>
15. Tang Q., Li L., Zhang S., Zheng L., Miao C. // J. Chem. Exploration. 2018. V. 186. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.jexplo.2017.11.018>
16. Dang Z., Liu C., Haigh M.J. // Environmental Pollution. 2002. V. 118. № 3. P. 419.
17. Касимов Н.С., Власов Д.В. // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2015. № 2. С. 7.
18. Шнирт М.Я., Раишевский В.В. Микроэлементы горючих ископаемых. М.: Кучково поле, 2010. 384 с.
19. Dong Y., Lu H., Lin H. // Environmental Research. 2023. V. 217. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114871>
20. Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 № 552 “Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения” URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201701160006?rangeSize=50>