

УДК 546.3: [658.567:621.311.2]

DOI: 10.15372/KhUR20160606

## Изучение распределения макро- и микроэлементов в отходах обогащения углей Кузнецкого угольного бассейна

Н. В. ЖУРАВЛЕВА<sup>1</sup>, Р. Р. ПОТОКИНА<sup>1</sup>, З. Р. ИСМАГИЛОВ<sup>2</sup>, Н. В. НАГАЙЦЕВА<sup>3</sup><sup>1</sup>ОАО «Западно-Сибирский испытательный центр»,  
Новокузнецк, Россия

E-mail: zhuravleva\_nv@zsic.ru

<sup>2</sup>Институт углехимии и химического материаловедения  
Федерального исследовательского центра угля и углехимии Сибирского отделения РАН,  
Кемерово, Россия

E-mail: iccms@iccms.sbras.ru

<sup>3</sup>Новокузнецкий институт,  
филиал Кемеровского государственного университета,  
Новокузнецк, Россия

E-mail: natalya.nagaytseva@yandex.ru

(Поступила 22.09.16)

### Аннотация

Объемы накопленных отходов углеобогащения и тенденции к их увеличению в ближайшие десятилетия представляют серьезную проблему для ряда регионов России. В то же время они могут найти применение в качестве техногенного сырья и вторичных энергоресурсов. С целью определения возможности их безопасного использования в технологиях переработки и захоронения изучено распределение токсичных элементов и токсичных соединений в породах углеобогащения углей Кузнецкого угольного бассейна. По результатам анализа 17 проб отходов углеобогащения рассчитаны основные статистические характеристики для массивов данных, включающих содержание токсичных элементов в валовых и подвижных формах в исследованных образцах. Установлено, что концентрации валовых форм токсичных элементов (кадмий, ванадий, медь, никель) не превышают предельно допустимых показателей для основных типов почв Кемеровской области. Для отходов углеобогащения характерно максимальное среднее валовое содержание серы (1397 мг/кг), марганца (943 мг/кг) и цинка (115 мг/кг). Максимальное превышение ПДК подвижных форм элементов наблюдается для меди (84.6 %), свинца (69.2 %), никеля (53.8 %) и марганца (46.2 %). Определены доверительные интервалы концентраций меди и марганца, содержащихся в отходах углеобогащения в подвижной форме и подчиняющихся нормальному распределению. Выявлена взаимосвязь содержания в отходах углеобогащения цинка и фтора в подвижной форме. По кратности превышения показателей для подвижных форм токсичных элементов, содержащихся в отходах углеобогащения, может быть предложен следующий ряд: F > Pb > Zn > Cu > Ni > Mn.

**Ключевые слова:** породы углеобогащения, токсичные элементы, валовые, подвижные формы элементов, отходы

### ВВЕДЕНИЕ

Программа развития угольной промышленности России на период до 2030 г. [1] предусматривает создание новых технологических комплексов по добыче и обогащению угля,

обеспечивающих эффективное использование ресурсного потенциала отрасли во всех угледобывающих регионах. В первую очередь это подразумевает ввод новых обогатительных фабрик на территории Кузбасса – основного угольного бассейна страны, на долю

которого приходится 59 % общего объема добычи угля в России.

За период с 2000 по 2013 гг. объем добычи угля в Кемеровской области увеличился на 85 % (до 203 млн т/год), а доля обогащаемого угля – с 40 до 71,4 %. В 2015 г. в России произведено 180 млн т обогащенного угля, что на 7 млн т больше по сравнению с 2014 г. [2]. Рост спроса на угли с повышенной калорийностью на мировом рынке влечет за собой не только развитие существующих мощностей и ввод в строй новых предприятий по обогащению угля, но и образование отходов углеобогащения: на них приходится четверть всего добытого угля [3]. Накопленный объем отходов углеобогащения в виде шламов, кеков, флотохвостов в России оценивается в 120 млн т [4]. По прогнозам, в результате деятельности предприятий углеобогащения в ближайшие 15 лет образуется примерно 240 млн т отходов обогащения [5], которые оказывают масштабное и продолжительное негативное воздействие на окружающую природную среду, содержат экологически опасные вещества, выделяющиеся из угля в процессе проведения обогащения, и склонны к самовозгоранию [5, 6]. На территории Кемеровской области работает 40 обогатительных фабрик. ЦОФ “Абашевская” и ЦОФ “Кузнецкая” (Новокузнецк) ежегодно сбрасывают в шламонакопители 120 тыс. т отходов углеобогащения [7]. На некоторых обогатительных фабриках практикуется размещение образующейся при обогащении породы совместно с породой вскрыши от основного производства [8].

Накопленные отходы углеобогащения, химический состав которых, как правило, не определяется, служат источниками химического загрязнения окружающей среды, в том числе поверхностных и подземных вод. В то же время это ценное техногенное сырье, которое может применяться в качестве компонента для производства строительных материалов, глинозема, а также как вторичный энергоресурс. Согласно “Нормам радиационной безопасности” (НРБ-99), по удельной эффективности естественных радионуклидов отходы углеобогащения относятся к первому классу материалов, которые могут использоваться для изготовления изделий, применяемых в жилых и общественных зданиях [9].

В работах [10, 11] с позиции возможности применения отходов углеобогащения для получения теплоизоляционных материалов приводятся оксидный и элементный химические составы шламов флотационного углеобогащения; химический состав отходов углеобогащения ГОФ “Томусинская”. С целью разработки новых декоративных стекол и стекломатериалов в [12] изучен оксидный состав флотационных хвостов углеобогащения. В статье [13] рентгенофлуоресцентным методом определено содержание микро- и макроэлементов в слабомагнитной смеси отходов углеобогащения, образующихся на ОАО “Северсталь”. В исследованиях [4, 14] отходы углеобогащения классифицируются по содержанию в них углерода на две группы: отходы, в которых содержится более 24 % углерода, предлагается обогащать или сжигать, а отходы с содержанием углерода менее 24 % – использовать в строительстве, черной и цветной металлургии, в сельском хозяйстве. Исследованию распределения ванадия, цинка, кадмия, свинца и хрома в отходах углеобогащения посвящена работа [15]. Отмечено, что эти элементы являются спутниками серы, которая содержится в отходах углеобогащения Донбасса, а их соединения даже в незначительных концентрациях отличаются особой токсичностью. В исследовании [16] проводится оценка скорости миграции в водные потоки и биологические циклы токсичных микроэлементов и солей, содержащихся в отходах углеобогащения. Автор [16] также отмечает, что для достоверной оценки потенциальной экологической опасности отходы углеобогащения изучены недостаточно полно.

При использовании отходов углеобогащения в производстве строительных материалов и жилищном строительстве необходимо определить концентрацию в них токсичных элементов [3].

Таким образом, продуктивное и безопасное для окружающей среды использование отходов углеобогащения предполагает полную осведомленность об их химическом составе, о содержании в них токсичных элементов, а также о степени их миграции в водную среду.

Цель данной работы – изучение распределения микро- и макроэлементов в отходах углеобогащения для минимизации экологических рисков при их переработке и захоронении.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

Объектами изучения служили 17 образцов отходов обогащения углей Кузнецкого угольного бассейна, исследованных в ОАО “Западно-Сибирский испытательный центр”.

Отбор проб отходов углеобогащения производили в соответствии с нормативным документом [17], который устанавливает общие требования к отбору представительной пробы минеральных отходов.

Для изучения распределения токсичных элементов в отходах углеобогащения выбран перечень показателей, содержание которых нормируется в объектах окружающей среды [18]. Кроме того, определено содержание бенз(а)пирена, фенола, формальдегида, которые также могут присутствовать в отходах углеобогащения. В программу исследований включено также определение нефтепродуктов, СПАВ, которые могут загрязнять отходы углеобогащения в местах их складирования, а также концентрации цианидов и нитратов.

Концентрации элементов в пробах определялись методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (Liberty Series II, (Varian, США), iCAP 6300 Duo (Thermo Scientific, Англия) по аттестованным методикам [19, 20]. Пробоподготовку для определения валового содержания элементов в пробах отходов углеобогащения осуществляли в герметичных пластиковых емкостях для разложения в смеси азотной и соляной кислот с использованием нагревательной платформы HotBlock (Environmental Express, Англия). Определение подвижных форм металлов проводили после выдерживания исследуемой пробы в течение 24 ч в ацетатно-аммонийном буферном растворе с pH 4.8 при комнатной температуре.

Содержание бенз(а)пирена в пробах определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с использованием прибора LC-20AD Prominence (Shimadzu, Япония) по [21], фенола – методом хромато-масс-спектрометрии, прибор SCION SQ Select (Bruker, США), согласно [22]. Для определения концентрации нефтепродуктов [23] и влаги [24] применялся метод гравиметрии; метод фотометрии использовался для измерений массовой доли формальдегида [25] и СПАВ [26].

Концентрацию нитратов определяли потенциометрическим методом [27]. Содержание углерода в пробах отходов углеобогащения установлено с помощью элементарного анализатора ELTRA CHS 580 (Eltra GmbH, Германия) по ГОСТ Р 54244–2010 [28]. Все аналитические исследования выполнены в ОАО

ТАБЛИЦА 1

Валовое содержание токсичных элементов, токсичных соединений, основных оксидов в отходах углеобогащения

Показатели	Содержание	
	Диапазоны	Среднее
<i>Токсичные элементы, мг/кг</i>		
Кадмий	0.05–0.40	0.33
Свинец	10.00–82.00	29.72
Ванадий	12.–89.60	52.47
Ртуть	0.0001–4.66	0.57
Мышьяк	1.00–24.00	7.00
Хром	22.00–70.20	39.42
Марганец	373.0–1630.0	943.3
Сурьма	1.00–5.20	1.65
Сера общая	100.0–4800.0	1396.7
Медь	16.77–24.60	20.10
Цинк	30.0–300.0	115.5
Никель	6.40–24.21	18.80
Кобальт	7.69–73.37	24.91
<i>Токсичные соединения, мг/кг</i>		
Бенз[а]пирен	0.001	0.001
Нефтепродукты	0.13–60.00	14.30
Нитраты	0.62–34.70	7.67
Формальдегид	0.03–5.50	1.11
Фенолы	0.0005–0.05	0.011
СПАВ	0.015–1.85	0.26
Цианиды	0.01–0.50	0.12
<i>Оксиды элементов, %</i>		
Триоксид алюминия	11.47–19.63	14.73
Диоксид кремния	14.20–57.61	46.48
Триоксид железа	2.99–14.50	7.77
Диоксид титана	0.15–0.73	0.57
Оксид кальция	0.7–9.2	4.1
Оксид магния	0.71–7.98	2.38
Оксид калия	1.10–3.42	2.00
Оксид натрия	0.31–1.80	1.06
Пентаоксид фосфора	0.01–0.45	0.12
<i>Прочие, %</i>		
Углерод	8.16–35.52	17.89
Влага	0.30–7.69	2.46

“Западно-Сибирский испытательный центр”  
(аттестат аккредитации № RA.RU.21АЯ07).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изучен химический состав отходов обогащения углей Кузнецкого угольного бассейна. В табл. 1 приведены диапазоны и средние значения валовых содержаний токсичных элементов, токсичных соединений, основных оксидов.

Из результатов исследований компонентного состава отходов углеобогащения следует:

1) доля токсичных элементов и соединений составляет в среднем примерно 0.5 % отходов углеобогащения;

2) среди токсичных элементов, содержащихся в отходах углеобогащения, преобладают сера, марганец и цинк;

3) содержание высокоопасных элементов (Cd, Pb, Hg, As, Zn) варьирует в широких пределах, особенно для ртути, мышьяка и цинка;

4) основные оксиды – диоксид кремния, триоксид алюминия и триоксид железа;

5) содержание углерода в отходах углеобогащения составляет в среднем 17.89 %;

6) формальдегид, фенолы, СПАВ содержатся в незначительных количествах и являются нехарактерными загрязнителями для данного типа отходов.

При обработке большого массива данных (112 проб) по распределению валовых содер-

ТАБЛИЦА 2

Основные статистические характеристики массива данных по валовому содержанию токсичных элементов и соединений, в пробах отходов углеобогащения, мг/кг

Элементы/соединения	$\bar{x}$	ПДК	$s_{\bar{x}}$	Me	Mo	$\sigma$	D	$E_k$	$A_s$
<i>Токсичные элементы</i>									
Кадмий	0.32	10	0.04	0.40	0.40	0.15	0.022	0.50	-1.56
Свинец	28.9	32.0	5.02	24.0	18.0	19.46	378.6	2.97	1.70
Ванадий	52.5	150.0	5.83	44.80	44.8	22.56	509.1	0.008	0.39
Ртуть	0.57	21	0.31	0.20	0.20	1.19	1.41	11.59	3.34
Мышьяк	7.0	20	2.05	3.86	1.00	7.68	58.91	0.78	1.33
Хром	39.1	90.0	3.77	35.0	35.0	14.62	213.75	0.12	0.81
Марганец	943.3	1500.0	116.5	927.2	927.21	420.1	176 482	-0.56	0.4
Сурьма	1.7	45	0.36	1.06	1.0	1.23	1.52	6.95	2.58
Сера общая	1396.7	160.0	478.3	800.0	100.0	1656.9	274 5224.0	-0.01	1.16
Медь	20.1	55.0	1.18	19.52	-	2.88	83	-0.51	0.62
Цинк	115.5	110.0	62.47	66.08	-	124.95	15 612.16	3.35	1.82
Никель	18.8	85.0	4.16	22.3	-	8.32	69.24	3.77	-1.92
Кобальт	24.9	-	16.17	9.28	-	32.34	1045.9	3.96	1.99
<i>Токсичные соединения</i>									
Бенз[а]пирен	0.001	0.02	$6.5 \cdot 10^{-20}$	0.001	0.001	$2.3 \cdot 10^{-19}$	$5.1 \cdot 10^{-38}$	-2.44	-1.15
Нефтепродукты	14.3	-	5.6	1.07	0	21.71	471.19	0.89	1.48
Нитраты	7.7	130.0	2.51	4.9	2.5	9.06	82.12	7.15	2.51
СПАВ	0.26	-	0.17	0.02	0.02	0.57	0.32	7.28	2.67
Фенол	0.01	-	0.006	0.0005	0.0005	0.021	0.0004	0.5	1.57
Формальдегид	1.11	7.0	0.56	0.13	0.025	1.87	3.49	2.5	1.85
Цианиды	0.12	-	0.056	0.005	0.005	0.21	0.04	0.4	1.51

Примечание. Здесь и в табл. 4:  $\bar{x}$  – выборочная средняя величина; ПДК – предельно допустимая концентрация для почвы [33–35], мг/кг;  $s_{\bar{x}}$  – стандартная ошибка средней величины; Me – медиана; Mo – мода;  $\sigma$  – средне-квадратическое отклонение; D – дисперсия;  $E_k$  – выборочный коэффициент эксцесса;  $A_s$  – выборочный коэффициент асимметрии. Прочерк – значение не нормируется или не может быть рассчитано.

жаний токсичных элементов во вскрышных и вмещающих породах угольных месторождений Кемеровской области, в работе [29] определены диапазоны содержаний для ванадия, меди, хрома, свинца, цинка, марганца, близкие к полученным нами для отходов углеобогащения.

Отходы углеобогащения, содержащие значительное количество горючей массы, могут быть подвергнуты дополнительному обогащению с целью получения твердого топлива или использованы для непосредственного сжигания или газификации. Кроме того, имеются разработки, исследующие возможность восстановления руд отходами углеобогащения в плазменных генераторах: предполагается, что в этом процессе можно получить восстановленный рудный материал, а отходящие газы использовать для выработки электроэнергии [30].

В результате статистической обработки [31, 32] массива данных по валовому содержанию токсичных элементов и соединений в пробах отходов углеобогащения получены основные статистические характеристики (табл. 2).

Видно, что для некоторых элементов выборочное среднее значение существенно выше ПДК в почве. Оценка объема таких значений и кратность их превышения ПДК приведены в табл. 3.

ПДК серы в валовой форме в почвах превышена до 30 раз, мышьяка – до 12. Для других токсичных элементов этот показатель незначителен. Таким образом, исходя из величины крат-

ТАБЛИЦА 3

Кратности превышения предельно допустимой концентрации валовых форм токсичных элементов и соединений в отходах углеобогащения

Элемент/соединение	Доля проб с превышением ПДК, %	Кратность превышения, разы
Свинец	26.7	1.2–2.6
Ртуть	6.7	2.2
Мышьяк	57.1	1.8–12.0
Сурьма	8.3	1.16
Марганец	15.4	1.1
Сера общая	58.3	3.8–30.0
Цинк	25.0	2.7

ности превышения показателей, при проведении мероприятий экологического мониторинга территорий, вблизи которых расположены отвалы отходов углеобогащения, следует руководствоваться следующим приоритетным рядом элементов: S > As > Zn > Pb > Hg > Sb > Mn.

С целью определения степени доступности токсичных элементов для растений и степени миграции их в водную среду для этих же проб отходов углеобогащения проведен анализ содержания подвижных форм элементов. Основные статистические характеристики массива данных по содержанию подвижных форм токсичных элементов, а также их ПДК представлены в табл. 4.

Сравним статистические характеристики с ПДК для каждого из элементов, содержащих-

ТАБЛИЦА 4

Основные статистические характеристики массива данных содержания подвижных форм токсичных элементов отходов углеобогащения, мг/кг

Элементы	$\bar{x}$	ПДК	$s_{\bar{x}}$	Me	Mo	$\sigma$	D	$E_k$	$A_s$
Свинец	11.82	60	3.89	7.0	7.0	14.03	196.7	7.57	2.64
Хром	1.27	60	0.24	1.85	2.0	0.85	0.72	-1.91	-0.46
Марганец	371.7	300.0	79.46	255.1	375.0	286.5	82090.3	-0.18	0.95
		700.0							
Медь	9.15	30	1.67	9.2	12.0	6.02	36.22	-0.87	0.11
Цинк	28.96	23.0	11.2	11.0	35.0	40.37	1629.7	5.8	2.31
Никель	6.27	40	1.33	5.0	4.0	4.81	23.13	2.61	1.38
Кобальт	0.14	50	0.03	0.08	0.08	0.12	0.014	2.76	2.03
Фтор	10.03	28	7.66	2.2	2.15	25.42	646.01	10.99	3.31
Фтор водорастворимый	6.84	10.0	5.18	1.73	0.95	16.39	268.58	9.96	3.15

Примечание. Обозн. см. табл. 2.

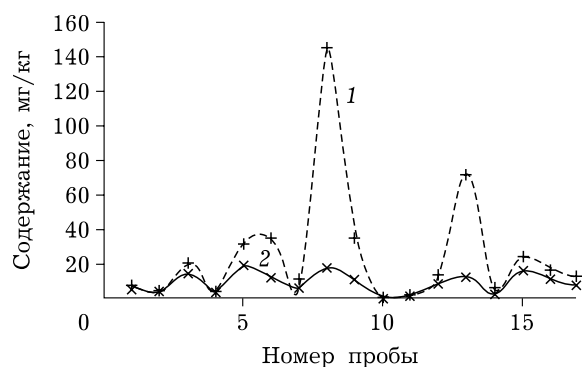


Рис. 1. Содержание цинка (1) и меди (2) в подвижной форме в серии образцов пород углеобогащения.

ся в отходах углеобогащения, можно сделать вывод о том, что содержание хрома и кобальта в подвижной форме находится в пределах допустимой нормы. Содержание фтора, цинка и марганца для рассмотренных проб отходов углеобогащения превышает ПДК для 27.3, 38.5 и 46.2 % проб соответственно, причем максимальная кратность превышения ПДК по содержанию фтора в подвижной форме достигает 30.9 раз. Для 53.8 % проб зафиксировано повышенное содержание никеля. Повышенное содержание свинца и меди характерно для 69.2 и 84.6 % проб соответственно. Для подвижных форм токсичных элементов, содержащихся в отходах углеобогащения, по величине кратности превышения ПДК установлен следующий ряд элементов:  $F > Pb > Zn > Cu > Ni > Mn$ .

Сравнив полученные данные с результатами, определенными ранее для вскрышных и вмещающих пород [29], получим, что содержание свинца, мышьяка, цинка и марганца в валовой форме в отходах углеобогащения превышает аналогичные показатели для вскрышных и вмещающих пород, в то время как в породах углеобогащения выявлено значительно более низкое содержание никеля. В то же время в отходах углеобогащения, как и во вскрышных и вмещающих породах, максимальное содержание в подвижной форме зафиксировано для свинца, меди, никеля и цинка.

Проведенный корреляционный анализ данных выявил наличие связи по содержанию цинка и фтора ( $r = 0.83$ ), меди и цинка ( $r = 0.69$ ) для подвижных форм токсичных элементов

отходов углеобогащения. На рис. 1 представлено распределение цинка и меди в подвижной форме в исследованных пробах отходов углеобогащения.

Определены с уровнем вероятности 95 % доверительные интервалы содержания для элементов, подчиняющихся в подвижной форме нормальному распределению, мг/кг: медь  $9.15 \pm 3.27$ , марганец  $371.68 \pm 155.75$ .

## ВЫВОДЫ

1. Компонентный состав исследованных отходов углеобогащения позволяет отнести их к потенциальному источнику токсичных элементов и соединений.

2. При проведении мероприятий экологического мониторинга территорий, вблизи которых расположены отвалы отходов углеобогащения, следует руководствоваться следующим приоритетным рядом элементов:  $S > As > Zn > Pb > Hg > Sb > Mn$ .

3. Определены доверительные интервалы для подвижных форм меди и марганца, с уровнем значимости 0.95.

4. Выявлена взаимосвязь содержания в отходах углеобогащения цинка и фтора, меди и цинка в подвижной форме.

5. Для подвижных форм токсичных элементов, содержащихся в отходах углеобогащения, по величине кратности превышения ПДК установлен следующий ряд элементов:  $F > Pb > Zn > Cu > Ni > Mn$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Программа развития угольной промышленности России на период до 2030 года. Москва, 2014 г. Режим доступа: URL: [http://minenergo.gov.ru/sites/default/files/texts/433/59818/Programma\\_razvitiya\\_ugolnoy\\_promyshlennosti\\_Rossii\\_na.pdf](http://minenergo.gov.ru/sites/default/files/texts/433/59818/Programma_razvitiya_ugolnoy_promyshlennosti_Rossii_na.pdf) (дата обращения 30.06.2016).
- 2 Переработка и обогащение угля. Режим доступа: URL: <http://minenergo.gov.ru/node/436> (дата обращения 30.06.2016).
- 3 Мелентьев Г. Б., Малинина Е. Н. // Экология пром. пр-ва. 2008. № 3. С. 41–53.
- 4 Лурий В. Г., Панкратов А. Н. // Уголь. 2013. № 11. С. 36–38.
- 5 Ефимов В. И., Никулин И. Б., Рыбак В. Л. // Изв. ТулГУ. Науки о земле. 2014. Вып. 1. С. 85–96.
- 6 Борук С. Д., Юзык А. В., Горобець Д. В. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2006. № 5. С. 104–106.
- 7 Филиппова Л. // Уголь Кузбасса. 2016. № 1. С. 71–73.
- 8 Пономарев А. // Уголь Кузбасса. 2015. № 1. С. 20–21.

- 9 Карпачева А. А. // Управление отходами – основа восстановления экологического равновесия в Кузбасе: сб. докладов второй Междунар. науч.-практ. конф. Новокузнецк, 2008. С. 78–82.
- 10 Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2013. Т. 15, № 4–1. С. 82–95.
- 11 Рошупкина И. Ю., Абдрахимов В. З., Денисов Д. Ю. // Башк. хим. журн. 2010. Т. 17, № 2. С. 136–138.
- 12 Лазарева Е. А., Тышланган Ю. С. // Строит. материалы, оборудование, технологии XXI века. 2014. № 10 (189). С. 44–45.
- 13 Дуров Н. М., Подгородецкий Г. С., Коровушкин В. В., Юсфин Ю. С. // Экология и пром-сть России. 2011. № 1. С. 56–59.
- 14 Панова В. Ф., Панов С. А. // Вестн. Сиб. гос. индустр. ун-та. 2015. № 2 (12). С. 71–75.
- 15 Волкова Т. П., Власов П. А., Шалованов О. Л., Костюченко А. Л. // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. 2009. № 5–2. С. 287–304.
- 16 Выборов С. Г. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-геологічна. 2014. № 1 (20). С. 28–37.
- 17 ПНД Ф 12.4.2.1–99. Отходы минерального происхождения. Рекомендации по отбору и подготовке проб. Общие положения. М.: Гос. комитет РФ по охране окружающей среды, 1999. 16 с.
- 18 СанПиН 2.1.7.1287–03. “Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почв”. Утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 16 апреля 2003 г.
- 19 ПНД Ф 16.1:2.3:3.11–98. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. М.: Гос. комитет РФ по охране окружающей среды, 1998. 30 с.
- 20 ПНД Ф 16.1:2.3:3.50–08. Методика выполнения измерения массовых долей подвижных форм металлов (цинка, меди, никеля, марганца, свинца, кадмия, хрома, железа, алюминия, титана, кобальта, мышьяка, ванадия) в почвах, отходах, компостах, кеках, осадках сточных вод атомно-эмиссионным методом с атомизацией в индуктивно-связанной аргоновой плазме. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2008. 16 с.
- 21 ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.62–09. Методика выполнения измерений массовых долей полициклических ароматических углеводородов в почвах, донных отложениях, осадках сточных вод и отходах производства и потребления методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2009. 23 с.
- 22 ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.60–09. Методика выполнения измерений массовых долей фенола и фенолпроизводных в почвах, осадках сточных вод и отходах производства и потребления методом хромато-масс-спектрометрии. М.: Федеральная служба по надзору в сфере природопользования, 2009. 20 с.
- 23 ПНД Ф 16.1:2:2.2:2.3:3.64–10. Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв, грунтов, донных отложений, илов, осадков сточных вод, отходов производства и потребления гравиметрическим методом. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2010. 14 с.
- 24 ПНД Ф 16:2.2:2.3:3.58–08. Методика выполнения измерений массовой доли влаги в твердых и жидких отходах производства и потребления, почвах, осадках, шламах, активном иле, донных отложениях гравиметрическим методом. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2008. 10 с.
- 25 ПНД Ф 16.1:2.3:3.45–05. Методика выполнения измерений массовой доли формальдегида в пробах почв, осадков сточных вод и отходов фотометрическим методом с хромотроповой кислотой. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2005. 18 с.
- 26 ПНД Ф 16.1:2:2.2:3.66–10. Методика измерений массовой доли анионных поверхностно-активных веществ (АПАВ) в пробах почв, грунтов, донных отложений, илов, отходов производства и потребления фотометрическим методом. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2010. 20 с.
- 27 ПНД Ф 16.1:3.72–2012. Методика измерений массовой доли нитрат-ионов в пробах почв, отходов от водоподготовки, обработки сточных вод и использования воды потенциометрическим методом. Екатеринбург: Федеральная служба по надзору в сфере природопользования, 2012. 12 с.
- 28 ГОСТ Р 54244–2010 (ИСО 29541:2010). Топливо твердое минеральное. Инструментальный метод определения углерода, водорода и азота. М.: Стандартинформ, 2011. 12 с.
- 29 Журавлева Н. В., Иваницкая О. В., Исмагилов З. Р., Потокина Р. Р. // Горн. информ.-аналит. бюлл. 2015. № 3. С. 187–196.
- 30 Панишев Н. В., Бигеев В. А., Галиулина Е. С. // Теория и технология металлургического производства. 2015. № 2 (17). С. 69–76.
- 31 Дерффель К. Статистика в аналитической химии. М.: Мир, 1994. 268 с.
- 32 Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализ данных на компьютере. СПб.: Питер, 2003. 688 с.
- 33 Санитарные нормы допустимых концентраций химических веществ в почве. СанПиН 42–128–4433–87. М.: Мин-во здравоохранения СССР, 1988. 19 с.
- 34 Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2511–09. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 11 с.
- 35 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041–06. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 15 с.

