

DOI: 10.26730/1999-4125-2020-3-27-32

УДК 622.64.001.5

ХАРАКТЕРИСТИКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЗОЛЫ САПРОПЕЛИТОВЫХ УГЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

CHARACTERISTIC OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF SAPROPELITE COAL ASH FROM VARIOUS DEPOSITS

Федорова Наталья Ивановна¹

канд. хим. наук, e-mail: FedorovaNI@iccms.sbras.ru

Natalia I. Fedorova¹, C.Sc. in Chemistry, leading researcher,

Исмагилов Зинфер Ришатович^{1,2}

академик РАН, заведующий кафедрой, e-mail: Zinfer1@mail.ru

Zinfer R. Ismagilov^{1,2}

Academician of the Russian Academy of Sciences, Head of Department

¹Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
650000, Россия, г. Кемерово, Советский пр., 18

¹Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS, 650000, Kemerovo, 18, pr. Sovietsky,
Russian Federation

²Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

²T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyya St, Kemerovo, 650000, Russian
Federation

Аннотация:

Актуальность работы определяется тем, что состав золы различного вида твердых горючих ископаемых относится к числу факторов, определяющих как технологию их сжигания, так и химико-технологические приемы их переработки. Обычно минералогический состав углей различен, при этом размер включений и степень гомогенности распределения минеральных веществ изменяются в довольно широких пределах. Следовательно, необходимы исследования минеральной части твердых топлив для решения задачи поиска рациональных, энергосберегающих технологий их переработки.

В данной работе представлены результаты исследования состава зольных остатков сапропелитовых углей различных месторождений.

В качестве объектов исследования использовались восемь образцов сапропелитовых углей, которые были охарактеризованы по данным технического и элементного анализов.

Минеральная часть сапропелитов характеризовалась составом зольных остатков по 10 основным оксидов. По данным химического состава их золы были рассчитаны коэффициенты плавления $K_{пл}$ и индекс основности I_0 , величина которого указывает на низкую основность зольных остатков. При определении шлакующих и загрязняющих свойств зол исследуемых углей установлено, что практически все образцы обладают достаточно низкой способностью к шлакованию и загрязнению поверхностей нагрева.

Ключевые слова: сапропелитовые угли; элементный состав; химический состав золы; плавкость; шлакующие и загрязняющие свойства золы.

Abstract:

The relevance of the work is determined by the fact that ash composition of various types of solid fossil fuels is one of the factors that determines both the technology of their burning and the chemical and technological methods of their processing. Usually, the mineralogical composition of coals is different, while the size of inclusions and the degree of homogeneity of the distribution of mineral substances vary over a fairly wide range. Therefore, it is necessary to study the mineral part of solid fuels to solve the problem of finding rational, energy-saving technologies for their processing.

This paper presents the results of a study of the composition of ash residues of sapropelite coals of various

deposits.

Eight samples of sapropelite coals were used as the objects of study and they were characterized using the data technical and elemental analyses.

The mineral part of sapropelites was characterized by the ash residues composition by 10 basic oxides. According to the chemical composition of their ash, melting coefficients K_{pl} and basicity index I_0 , were calculated, the value of the latter indicates a low basicity of ash residues. In the process of determining the slagging and polluting properties of the ashes of the studied coals, it was found that almost all samples had a rather low ability to slag and contaminate the heating surfaces.

Key words: sapropelite coals; elemental composition; chemical composition of ash; fusibility; slag and polluting properties of ash.

Сапропелитовые угли и горючие сланцы представляют собой твердые полезные ископаемые осадочно-органогенного происхождения, содержащие различное количество органического вещества (керогена), способные при сжигании давать тепло, а при термическом воздействии – выделять значительное количество жидких и газообразных химических продуктов. Основное направление использования данного вида топлива – технологическое, так как оно наиболее перспективно для получения жидких углеводородных продуктов, например, смолы и водорастворимых фенолов [1-3]. В последнее десятилетие интерес к переработке, например, горючих сланцев резко возрос. Многие страны, такие как США, Эстония, Китай, Бразилия, Казахстан и др., используют горючие сланцы в энергетической и химической промышленности [4-9]. При переработке горючих сланцев основными проблемами являются образование сланцевой мелочи и большого количества зольных отходов.

Известно, что состав золы различного вида твердых горючих ископаемых относится к числу факторов, определяющих как технологию их сжигания, так и химико-технологические приемы их переработки. Обычно минералогический состав углей различен, при этом размер включений и степень гомогенности распределения минеральных веществ изменяются в довольно широких пределах

[8]. Следовательно, необходимы исследования минеральной части твердых топлив для решения задачи поиска рациональных, энергосберегающих технологий их переработки.

В данной работе приведены результаты химического анализа зольных остатков сапропелитовых углей различных месторождений.

В качестве объектов использовались 8 образцов сапропелитовых углей, взятых из коллекции углей, формируемой в Институте углехимии и химического материаловедения ФИЦ УУХ СО РАН. Исследовались следующие образцы: таймыльский и чарчикский богхеды Ленского бассейна; сапропелиты Будаговского месторождения Иркутского бассейна; Соболевского месторождения Канско-Ачинского бассейна, Кушмурунского бурогоугольного месторождения (Тургайский бассейн), сапропелит Подмосковского угольного бассейна, отобранный на шахте Середейская, сапромиксит Барзасского месторождения Кузбасса и балхашит (озеро Балхаш, Казахстан).

Технический анализ проводили стандартными методами. Элементный состав органической массы сапропелитовых углей определяли с помощью элементного анализатора ThermoFlash 2000 (Thermo Fisher Scientific, Великобритания); результаты определений пересчитывали на сухое беззольное состояние

Таблица 1. Характеристика исследованных образцов сапропелитовых углей

Table 1. Characterization of the studied samples of sapropelite coals

Код образ ца	Технический анализ, %				Элементный состав, % на daf			Атомное отношение	
	W^a	A^d	V^{daf}	S_t^d	C	H	(N+S+O)	H/C	O/C
1	2,8	6,0	96,7	0,8	72,9	10,7	27,3	1,76	0,28
2	2,0	3,4	85,8	0,3	73,8	10,2	16,0	1,66	0,16
3	2,0	29,8	82,8	0,7	75,9	10,1	23,0	1,60	0,23
4	2,3	5,5	77,8	3,2	75,1	9,6	15,3	1,53	0,15
5	5,6	25,3	75,3	0,8	79,8	9,8	10,4	1,47	0,10
6	6,0	44,5	77,4	0,3	80,5	10,3	9,2	1,54	0,09
7	1,0	17,6	52,9	1,1	83,2	8,8	8,0	1,27	0,07
8	7,2	5,2	61,2	0,3	82,6	9,5	7,9	1,38	0,07

Примечание. 1 – балхашит, 2 – чарчикский, 3 – кушмурунский, 4 – середейский, 5 – соболевский, 6 – будаговский, 7 – барзасский, 8 – таймыльский

Таблица 2. Химический состав золы исследованных образцов сапропелитовых углей
Table 2. The chemical composition of the ash of the studied samples of sapropelite coals

Показатели	Код образца угля*							
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8
Химический состав золы по оксидам, %								
SiO ₂	48,4	31,0	56,6	52,0	43,2	59,6	70,2	34,7
Al ₂ O ₃	23,4	10,7	34,3	30,0	19,5	25,4	16,2	10,5
Fe ₂ O ₃	5,1	5,3	2,2	3,4	8,6	8,9	5,3	7,4
CaO	11,0	42,0	1,6	6,8	15,1	2,1	3,1	40,0
MgO	2,2	1,7	0,4	0,6	1,5	1,3	0,9	4,0
TiO ₂	0,3	0,7	3,5	1,5	3,0	0,5	0,9	0,4
Na ₂ O	1,3	2,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0	0,1
K ₂ O	0,8	0,8	0,1	0,1	3,0	1,8	2,3	0,1
SO ₃	7,5	5,7	1,2	5,5	6,0	0,3	0,1	2,8
CaO/ Fe ₂ O ₃	2,2	7,9	0,7	2,0	1,8	0,2	0,6	5,4
Al ₂ O ₃ / SiO ₂	0,5	0,3	0,6	0,6	0,5	0,4	0,2	0,3
SiO ₂ / Al ₂ O ₃	2,1	2,9	1,6	1,7	2,2	2,3	4,3	3,3
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ / CaO+ MgO	5,4	1,0	45,5	11,1	3,8	25,0	21,6	1,0
Индекс основности золы I ₀	0,28	1,24	0,05	0,13	0,45	0,17	0,15	1,14
Коэффициент плавления золы K _{пл}	3,9	0,9	21,6	7,6	2,5	6,9	9,3	0,9
Показатели плавкости золы, °С: температуры размягчения золы t _г температура жидкоплавкого состояния t _с	1261 1330	1130 1180	2014 2191	1417 1508	1200 1260	1388 1475	1489 1591	1131 1182
Расчетные характеристики шлакования: коэффициент вязкости шлака K _в температура нормального шлакоудаления T _{нж} , °С фактор шлакования R _с фактор загрязнения R _г	1,2 1449 0,23 0,37	0,5 1228 0,37 2,57	1,5 1547 0,03 0,01	1,3 1485 0,42 0,01	1,0 1388 0,34 0,04	1,6 1581 0,05 0,02	2,8 1949 0,16 0,14	0,6 1261 0,34 0,11

Примечание. 1 – балхашит, 2 – чарчикский, 3 – кумирунский, 4 – середейский, 5 – соболевский, 6 – будаговский, 7 – барзасский, 8 – таймырский

топлива (daf).

Золу для анализа получали медленным озолением аналитических проб углей в муфельной печи при температуре 815 °С согласно ГОСТ 11022-95. Химический состав золных остатков определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии на спектрометре с индукционно-связанной плазмой iCAP 6500 Duo LA фирмы «Thermo Scientific». В результате анализа определены основные компоненты, составляющие золу, а именно: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, TiO₂, Na₂O, K₂O.

Результаты технического анализа и элементный состав изученных образцов приведены в таблице 1. Видно, что образцы обладают повышенными значениями выхода летучих веществ, которые изменяются от 52,9 до 96,7%. Наибольшее значение определено в образце №1 (балхашит), наименьшее – в образце №7 Барзасского месторождения.

Практически все образцы являются малосернистыми, так как содержание серы

составляет величину менее 2%. Однако, образец №4 Середейского месторождения можно отнести к сернистым (содержание серы порядка 3%).

Зольность исследованных образцов сапропелитовых углей варьируется в довольно широких пределах. К низкозольным углям (величина A^d менее 10%) можно отнести образцы № 1,2,8 и 4 (Балхашского, Чарчикского, и Таймыльского месторождений и ш. Середейской). Образцы № 3,5,6 и 7 являются высокозольными (величина A^d более 20%). Наибольшей зольностью (A^d = 44,5%) характеризуется образец №6 Будаговского месторождения.

Химический состав проб золы приведен в таблице 2. Видно, что содержание основных оксидов, составляющих минеральную часть сапропелитовых углей, изменяется в довольно широких пределах. Например, в золе образцов №6 (Будаговское месторождение) и №5 (Соболевское месторождение) определено самое большое количество оксида железа 8,9 и 8,6%

соответственно.

Зола образцов №2 (Чарчикское месторождение) и №8 (Таймыльское месторождение) содержит самое большое количество оксида кальция (42,0 и 40,0% соответственно). Зольные остатки образцов №3 и №4 преимущественно состоят из оксидов кремния и алюминия.

По составу основных компонентов золы ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{CaO} + \text{MgO}$, таблица 2) в соответствии с принятой классификацией [10] образцы углей №2 и №8 относятся к карбонатному типу, №1 и №5 – карбонатно-алюмосиликатному, а образцы №6,3,4 и 7 – к алюмосиликатному типу.

Величина отношения (I_0), рассчитанная по формуле: $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ [11] для образцов углей меньше единицы, что указывает на низкую основность их зольного остатка.

Образцы углей №2 и 8 являются малоглиноземными, так как содержание Al_2O_3 в их золе менее 15% [10], к среднеглиноземным относятся образцы №1, 5, 6 и 7 (содержание Al_2O_3 не превышает 28%). Содержание Al_2O_3 более 28% определено в образцах №3 и №4, которые можно характеризовать как высокоглиноземными.

Известно, что разнообразие химического состава зольных остатков углей можно связать с фаціальными условиями их образования. Условия каждой геохимической фации (обстановка осадконакопления) способствует формированию только ей органоминеральных и минеральных соединений [8,13,14]. Отношение $\text{CaO} / \text{Fe}_2\text{O}_3$ связано со средой осадконакопления: при значении меньше единицы оно указывает на относительно кислую среду геохимической фации. Анализ полученных данных показывает, что образцы углей №1, 2, 4, 5 и 8 (таблица 2) имеют значения данного отношения больше единицы. Следовательно, можно предположить, что формирование органического материала проходило в аэробных условиях и менее кислой среде, что характерно для низинных болот [13].

Отношение $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ в значительной мере связано с минералогическим составом неорганических примесей угля, что указывает на преобладание определенной группы глинистых минералов. Для каолиновой группы и органоминеральных соединений это отношение не более двух, для монтмориллонитовой равно примерно 4,0 (3,5-5,5), промежуточное значение свидетельствует о наличии глинистых слюд [14]. В золе исследуемых углей отношение $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ изменяется в довольно широких пределах – от 1,6 (образец №3 Кушмурунского месторождения) до 4,3 (образец №7 Барзасского месторождения), в целом оставаясь сравнительно высоким, что говорит о присутствии в составе глинистого материала каолинита и гидрослюды. По довольно низкому показателю отношения $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$,

изменяющемуся от 0,2 до 0,6 (таблица 2) можно предположить, что в минеральной части исследуемых углей содержится большее количество кварцевых и кремнистых пород по сравнению с глинистыми.

Энерготехнологические свойства углей во многом определяются двумя параметрами – химическим составом золы и температурой ее плавления, знание которой необходимо для решения вопросов, связанных с технологией переработки, характеристики шлаков, золовых уносов, способов их удаления и утилизации.

Плавкостные свойства золы экспериментально определяются согласно ГОСТ 32978-2014 (ISO 540:2008) «Топливо твердое минеральное. Определение плавкости золы». Однако можно с достаточной точностью рассчитать температуры плавления из химического состава золы топлива по эмпирическим формулам, которые предложены на основании многочисленных экспериментальных данных [15]. Температуру размягчения золы t_e и температуру начала жидкоплавкого состояния t_c рассчитывают по следующим формулам:

$$t_e = 1094 + 42,5 K_{\text{пл}}$$

$$t_c = 1139 + 48,6 K_{\text{пл}}$$

где коэффициент плавления $K_{\text{пл}}$ есть безразмерная величина, равная отношению кислотных оксидов к щелочным: $K_{\text{пл}} = (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ [15,16].

Для исследуемых образцов согласно вышеприведенным формулам были рассчитаны температуры плавкости золы (t_e, t_c) (таблица 2), на основе которых зола угольных образцов №2, 5 и 8 отнесена к легкоплавкой ($t_e < 1200^\circ\text{C}$), золы остальных образцов – к тугоплавкой ($t_e > 1500^\circ\text{C}$) [12].

По данным химического состава золы были рассчитаны вязкостные характеристики – коэффициент вязкости шлака K_v и температура нормального шлакоудаления $T_{н.ш.}$:

$$K_v = \text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5 / \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}$$

;

$$T_{н.ш.} = 1085 + 314K_v.$$

Расчетные величины данных параметров приведены в таблице 2. Минимальными значениями температуры нормального шлакоудаления характеризуются образцы №2 и 8 (1228 и 1261 $^\circ\text{C}$ соответственно), максимальным значением (1949 $^\circ\text{C}$) – образец №7.

Определенный интерес при определении шлакоудаления и загрязняющих свойств твердого топлива представляют показатели шлакования R_s и загрязнения R_f , разработанные фирмой Babcock-Wilcox [17,18]:

$$R_s = B/A \times S_i^d, \quad R_f = B/A \times \text{Na}_2\text{O},$$

где B – сумма основных оксидов ($\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{CaO}, \text{MgO}, \text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}$); A – сумма кислых оксидов ($\text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2, \text{TiO}_2$); S_i^d – содержание в угле, %; Na_2O – содержание в золе, %.

Величина $R_s < 0,6$ относит золу к низкой степени шлакуемости, $R_s = 0,6 - 2,0$ – к средней, $R_s = 2,0 - 2,6$ к высокой и $R_s > 2,6$ – к сверхвысокой степени шлакуемости [17].

Загрязняющие свойства по значениям R_f классифицируются следующим образом: низкие – менее 0,2; средние – $0,2 \div 0,5$; высокие – $0,5 \div 1,0$; очень высокие – более 1,0 [17].

Расчетные значения параметров R_s и R_f для исследованных золных остатков сапропелитовых углей приведены в таблице 2. Анализ показывает, что практически все исследованные образцы обладают достаточно низкой способностью к шлакованию и загрязнению поверхностей нагрева. Однако следует отметить, что образец №2 Чарчикского месторождения при низкой степени шлакуемости (0,37) характеризуется самой высокой величиной фактора загрязнения (2,57).

Таким образом, исследован химический состав проб золы сапропелитовых углей различных месторождений. Показано, что содержание основных оксидов, составляющих минеральную часть углей, изменяется в достаточно широких пределах. Определено, что по составу основных компонентов золы в соответствии с принятой

классификацией образцы углей №2 и №8 относятся к карбонатному типу, №1 и №5 – карбонатно-алюмосиликатному, а образцы №6, 3, 4, 7 – к алюмосиликатному типу.

По эмпирическим формулам рассчитаны характерные температуры плавкости золы исследованных образцов (t_e , t_c). Зольные остатки образцов №2, 5 и 8 отнесены к легкоплавкой ($t_e < 1200^\circ\text{C}$), золы остальных образцов – к тугоплавкой ($t_e > 1500^\circ\text{C}$). Определено, что практически все исследованные образцы зол обладают достаточно низкой способностью к шлакованию и загрязнению поверхностей нагрева.

Работа выполнена с использованием оборудования Кемеровского центра коллективного пользования ФИЦ УУХ СО РАН. Авторы выражают благодарность сотрудникам ИУХМ ФИЦ УУХ СО РАН за помощь в выполнении и обсуждении результатов анализов: В.А. Зубакиной (технический анализ), О.С. Ефимовой (элементный состав), Р. П. Колмыкову (химический анализ золных остатков).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов, Д.Т. Горючие сланцы мира. – М.: Недра, 1975. – 368 с.
2. Мингареев, Р.Ш. Эксплуатация месторождений битумов и горючих сланцев / Р.Ш. Мингареев, И.И. Тучков. – М.: Недра, 1980. – 572 с.
3. Бодоев, Н.В. Сапропелитовые угли. – Новосибирск: Наука, Сиб отд-е, 1991. – 120 с.
4. Назаренко, М.Ю. Повышение эффективности использования горючих сланцев / М.Ю. Назаренко, Н.К. Кондрашева, С.Н. Салтыкова // Известия Санкт-Петербургского ГТИ (технического университета), 2017. – №38(64). – С. 76-80.
5. Страхов, В.М. Углистые сланцы Шубаркольского месторождения Казахстана. Качество и перспективы использования. – Кокс и химия, 2020. – №1. – С. 7-22.
6. Горючие сланцы Монголии / В.В. Савельев, Г.С. Певнева, Ж. Намхайноров, А.К. Головки // Химия твердого топлива, 2011. – №6. – С. 37-44.
7. Назаренко, М.Ю. Реакционная способность поверхности горючих сланцев Прибалтийского бассейна / М.Ю. Назаренко, Н.К. Кондрашева, С.Н. Салтыкова // Кокс и химия, 2016. – №5. – С. 33-37.
8. Шпирт, М.Я. Неорганические компоненты твердых топлив / М.Я. Шпирт, В.Р. Клер, И.З. Перциков. – М.: Химия, 1990. – 240 с.
9. Xie, F.F. Study on thermal conversion of Huadian oil shale under N_2 and CO_2 atmospheres / F.F. Xie, Z. Wang, W.G. Lin, W.L. Song // Oil shale, 2010. – V.27. – №4. – P. 309-320.
10. Месторождения горючих сланцев мира / М.В. Голицын [и др.]. – М.: Наука, 1988. – 263 с.
11. Оценка взаимосвязи химического состава и температуры жидкоплавкого состояния золы углей западного Донбасса / И.Д. Дроздник [и др.]. // Углекимический журнал, 2015. – 2. – С. 3-7.
12. Шпирт, М.Я. Рациональное использование отходов добычи и обогащения углей / М.Я. Шпирт, В.А. Рубан, Ю.В. Иткин. – М.: Недра, 1990. – 224 с.
13. Петрология углей / Э. Штах [и др.]. – М.: Мир, 1978. – 556 с.
14. Браунлоу, А.Х. Геохимия. – М.: Недра, 1984. – 463 с.
15. Еремин, И.В. Петрология и химико-технологические параметры углей Кузбасса / И.В. Еремин, А.С. Арцер, Т.М. Броневец. – Кемерово: Из-во Притомское, 2000. – 399 с.

16. Федорова, Н.И. Характеристика химического состава золы бурых углей различных месторождений / Н.И. Федорова, З.Р. Исмагилов // Кокс и химия, 2019. – №11. – С. 4-9.
17. Ghosh, S.K. Understanding thermal coal ash behavior // Mining Eng, 1985. – V.37. – N2. – P. 158-162.
18. Возможные пути предотвращения шлакования золы при газификации торфа в режиме фильтрационного горения / М.В. Цветков [и др.] // Журнал прикладной химии, 2017. – Т. 90. – №10. – С.1392-1398.

REFERENCES

1. Kuznecov, D.T. Gorjuchie slancy mira. – М.: Nedra, 1975. – 368 s.
2. Mingareev, R.Sh. Jekspluatacija mestorozhdenij bitumov i gorjuchih slancev / R.Sh. Mingareev, I.I. Tuchkov. – М.: Nedra, 1980. – 572 s.
3. Bodoev, N.V. Sapropelitovye ugli. – Novosibirsk: Nauka, Sib otd-e, 1991. – 120 s.
4. Nazarenko, M.Yu. Povyshenie jeffektivnosti ispol'zovanija gorjuchih slan-cev / M.Ju. Nazarenko, N.K. Kondrasheva, S.N. Saltykova // Izvestija Sankt-Peterburgskogo GTI (tehnicheskogo universiteta), 2017. – №38(64). – S. 76-80.
5. Strahov, V.M. Uglistyje slancy Shubarkol'skogo mestorozhdenija Kazahstana. Kachestvo i perspektivy ispol'zovanija. – Koks i himija, 2020. – №1. – S. 7-22.
6. Gorjuchie slancy Mongolii / V.V. Savel'ev, G.S. Pevneva, Zh. Namhajnorov, A.K. Golovko // Himija tverdogo topliva, 2011. – №6. – S. 37-44.
7. Nazarenko, M.Yu. Reakcionnaja sposobnost' poverhnosti gorjuchih slancev Pribaltijskogo bassejna / M.Yu. Nazarenko, N.K. Kondrasheva, S.N. Saltykova // Koks i himija, 2016. – №5. – S. 33-37.
8. Shpirt, M.Ya. Neorganicheskie komponenty tverdyh topliv / M.Ya. Shpirt, V.R. Kler, I.Z. Percikov. – М.: Himija, 1990. – 240 s.
9. Xie, F.F. Study on thermal conversion of Huadian oil shale under N₂ and CO₂ at-mospheres / F.F. Xie, Z. Wang, W.G. Lin, W.L. Song // Oil shale, 2010. – V.27. – №4. – P. 309-320.
10. Mestorozhdenija gorjuchih slancev mira / M.V. Golicyn [i dr.]. – М.: Nauka, 1988. – 263 s.
11. Ocenka vzaimosvjazi himicheskogo sostava i temperatury zhidkoplavkogo so-stojanija zoly uglej zapadnogo Donbassa / I.D. Drozdnic [i dr.]. // Uglehimicheskij zhurnal, 2015. – 2. – S. 3-7.
12. Shpirt, M.Ya. Racional'noe ispol'zovanie othodov dobychi i obogashhenija uglej / M.Ya. Shpirt, V.A. Ruban, Yu.V. Itkin. – М.: Nedra, 1990. – 224 s.
13. Petrologija uglej / E. Shtah [i dr.]. – М.: Mir, 1978. – 556 s.
14. Braunlou, A.H. Geohimija. – М.: Nedra, 1984. – 463 s.
15. Eremin, I.V. Petrologija i himiko-tehnologicheskie parametry uglej Kuz-bassa / I.V. Eremin, A.S. Arcer, T.M. Bronovec. – Kemerovo: Iz-vo Pritomskoe, 2000. – 399 s.
16. Fedorova, N.I. Harakteristika himicheskogo sostava zoly buryh uglej razlichnyh mestorozhdenij / N.I. Fedorova, Z.R. Ismagilov // Koks i himija, 2019. – №11. – S. 4-9.
17. Ghosh, S.K. Understanding thermal coal ash behavior // Mining Eng, 1985. – V.37. – N2. – P. 158-162.
18. Vozmozhnye puti predotvrashhenija shlakovanija zoly pri gazifikacii torfa v rezhime fil'tracionnogo gorenija / M.V. Cvetkov [i dr.] // Zhurnal prikladnoj himii, 2017. – Т. 90.

Поступило в редакцию 29.05.2020

Received 29 May 2020