

УДК 552.574.2

DOI: 10.15372/KhUR2020269

## Петрографическая характеристика сапропелитовых углей

Н. И. ФЕДОРОВА<sup>1</sup>, Н. А. ГРАБОВАЯ<sup>1</sup>, З. Р. ИСМАГИЛОВ<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,  
Кемерово (Россия)

E-mail: iccms@iccms.sbras.ru

<sup>2</sup>Институт катализа СО РАН,  
Новосибирск (Россия)

### Аннотация

Исследован петрографический состав сапропелитовых углей различных месторождений России. Выявлено, что в исследуемых образцах содержится более 75 % мацералов группы липтинита, 8–24 % мацералов группы витринита и минорные количества группы инертинитов (преимущественно фюзинит) – не более 1–2 %. Для определения генетической зрелости сапропелитовых углей использовали отражательную способность витринита. Установлено, что показатель отражения витринита в образцах варьируется в относительно узком диапазоне – от 0.27 % (образец Чарчикского месторождения) до 0.41 % (образец Таймылырского месторождения).

**Ключевые слова:** сапропелитовые угли, петрографический анализ, мацералы, липтинит, альгинит, витринит

### ВВЕДЕНИЕ

Сапропелиты (от греч. *saprus* – “гнилой” и *pelus* – “ил, грязь”) – ископаемые угли, образовавшиеся в результате преобразования остатков низших растений и простейших живых организмов в условиях озерных или лагунных фаций, в отличие от гумолитов (или “гумусовых углей”) – продуктов распада остатков высших растений в условиях болотных фаций. По составу, степени разложения и преобразования исходного материала выделяют собственно сапропелиты и гумито-сапропелиты [1, 2]. Сапропелиты характеризуются более высоким по сравнению с гумолитами выходом летучих веществ (55–70 %, иногда до 90 %), высоким содержанием водорода (7–12 %), повышенной теплотой сгорания. Они имеют сероватый оттенок, матовый блеск, раковистый излом и однородную структуру с отсутствием в ней полосчатости. Как правило, встречаются в виде маломощных прослоев и лишь в отдельных месторож-

дениях образуют целые пласты или пачки. Наиболее распространены собственно сапропелиты – богхеды и полубогхеды. Сапропелиты в рассеянных формах являются основным органическим веществом нефтематеринских пород.

Сапропелитовые угли слагают чаще всего маломощные прослои, далеко не всегда выдерживающиеся по площади месторождения на значительном расстоянии, что затрудняет их добычу. Как следствие, они до настоящего времени практически не используются. Однако благодаря химическому составу сапропелитовые угли могут служить сырьем для переработки с целью получения твердых и жидких углеводородных продуктов [3–8]. Для того чтобы правильно оценить свойства сапропелитов и определить наиболее рациональные области их использования, необходимо, в первую очередь, изучить их вещественно-петрографический состав.

В данной работе представлены результаты исследования петрографического состава сапропелитовых углей различных месторождений России.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объектов использовались шесть образцов сапропелитовых углей, взятых из коллекции Банка углей, формируемой в Институте углехимии и химического материаловедения ФИЦ УУХ СО РАН. Исследовались следующие образцы (код образца): Чарчикский (1) и Таймыльский (6) богхеды Ленского бассейна; сапропелит Подмосковского угольного бассейна, отобранный на шахте Середейская (2); сапропелит Соболевского месторождения Канско-Ачинского бассейна (3); сапропелит Будаговского месторождения Иркутского бассейна (4); сапромиксит Барзасского месторождения Кузбасса (5).

Чарчикское и Таймыльское месторождения расположены в Оленекском районе Ленского бассейна (Республика Саха, Якутия). Линзы и линзообразные прослои матовых, крепких, с раковистым изломом богхедов встречаются в пластах каменных углей. Мощность линз богхеда достигает на Чарчикском месторождении 2.5 м, на Таймыльском – 0.6 м [3, 9, 10].

Подмосковский угольный бассейн является одним из старейших в пределах европейской части России. В границах бассейна объединены многочисленные изолированные месторождения бурого угля. По петрографическим характеристикам в подмосковных углях выделяют гумолиты и сапропелиты. Сапропелитовые угли залегают прослоями мощностью от 0.3 до 1.0 м. Образец сапропелита был отобран на шахте Середейская (Сухиничский район, Калужская область, РФ), которая располагалась на западном крыле Подмосковского буроугольного бассейна [3, 11].

Соболевское месторождение расположено на востоке Итат-Боготольского угленосного района (Канско-Ачинский бассейн). Наиболее выдержанный пласт Мощный вскрыт по всей площади месторождения. Угли месторождения – бурые гумусовые, иногда смешанные сапропелитогумитовые. В ряде пластов в массе бурого угля обособляются пачки сапропелитов. Мощности пачек варьируются в широких пределах – от 0.65 до 8.30 м [3].

Будаговское месторождение находится в северо-западной части Иркутского угольного бассейна. Все известные угли данного бассейна находятся в пределах Черемховской свиты, к которой также приурочены основные месторождения сапропелитов и гумито-сапропелитов. Будаговское месторождение представлено сапропелитами высокого качества, черного цвета с буроватым оттенком, однородной структуры [3, 9].

Кузнецкий угольный бассейн помимо запасов каменного угля различного марочного состава располагает запасами сапропелитовых углей, которые залегают в Барзасском угленосном районе и приурочены к основанию среднедевонских отложений. Угли месторождения среди барзасской свиты образуют пласт Основной, мощность которого колеблется от 0.8 до 4.8 м. Тектоника месторождения простая, пласты деформированы слабо. Плитчатый уголь слагает основную часть пласта и откалывается крупными плитами, обычно легко расщепляется на более тонкие пластины [3, 12].

Подготовка образцов углей к анализу включала их дробление до размера частиц менее 1.6 мм и экстракцию спиртобензольной смесью (1 : 1) по методу Грефе в течение 6 ч, после чего образцы сушились при температуре 105 °С в сушильном шкафу до постоянной массы.

Для корректного проведения петрографического анализа высокозольные образцы Барзасского, Соболевского и Будаговского месторождений были обогащены в смеси  $CCl_4$  и бензола согласно ГОСТ 1186–2014, Приложение А. Для аналитических исследований использовалась фракция плотностью менее 1.5 г/см<sup>3</sup>. Поскольку зольность образцов Соболевского и Будаговского месторождений превышала 20 %, их дополнительно подвергали последовательной деминерализации концентрированными соляной и плавиковой кислотами.

Петрографический анализ выполняли с использованием автоматизированного комплекса оценки марочного состава углей системы SIAMS-620 (Россия) в среде масляной иммерсии. Порцию воздушно-сухой пробы, измельченной по ГОСТ Р 55663–2013, смешивали со связующим веществом (шеллаком), одну сторону которого обрабатывали на шлифовально-полировальном станке до получения гладкой поверхности.

При микроскопических исследованиях в отраженном свете использовали углепетрографическую терминологию, выделяя липтинит, витринит и интертинит [13–17]. Подсчет микрокомпонентов производился вручную по 100 точкам при увеличении в отраженном свете в 300 раз, их количественное соотношение определялось методом подсчета точек. Результаты петрографического исследования приведены на “чистый уголь”, без учета минеральных веществ. Для определения зрелости исследованных сапропелитов использовали отражательную способность витринита. Низкое содержание данного мацерала в образцах затрудняло ин-

терпретацию гистограмм отражения витринита, и ошибка в каждом из средних значений составила 0.1 %.

Технический анализ проводили стандартными методами. Общую серу вычисляли по методу Эшка согласно ГОСТ 8606–2015 (ISO 334:2013). Элементный состав органической массы сапропелитовых углей определяли с помощью элементного анализатора Thermo Flash 2000 (Thermo Fisher Scientific, Великобритания), результаты определений пересчитывали на сухое беззольное состояние топлива (daf).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика исследованных образцов сапропелитовых углей приведена в табл. 1. Образцы углей обладают повышенными значениями выхода летучих веществ – от 56.4 до 83.8 %. Большинство образцов малосернистые: содержание серы в их органической массе менее 2 %. Образец шахты Середейской (содержание серы – 3.2 %) можно отнести к сернистым. Зольность об-

разцов, подготовленных для петрографического анализа, составляла менее 11 % (см. табл. 1).

Характеристика петрографического состава сапропелитовых углей приведена в табл. 2. По результатам исследований в образцах зарегистрированы три группы мацералов: липтинит, витринит и инертинит.

Среди трех групп мацералов преобладает липтинит (более 75 %). Содержание мацералов группы витринита составляет 8–24 %, а мацералов группы инертинита минимальное – в общей сложности не выше 1–2 %. Выявленные инертинитовые компоненты преимущественно представлены фузинитом, который встречается единичными фрагментами с клеточной структурой (рис. 1, а), а также в совокупности с макринитом. Макринит – мацерал, который встречается в виде бесструктурных тел различной формы и размера (см. рис. 1, б). В отраженном свете цвет макринита изменяется от светло-серого до желто-белого.

В образцах исследованных сапропелитов липтинит преимущественно представлен мацералами группы альгинита. Группа альгинита объ-

ТАБЛИЦА 1

Характеристика исследованных образцов сапропелитовых углей

Код образца	Технический анализ, %				Элементный состав, % на daf			Атомное отношение	
	W <sup>a</sup>	A <sup>d</sup>	V <sup>daf</sup>	S <sub>t</sub> <sup>d</sup>	C	H	(N + S + O)	H/C	O/C
1	1.7	3.4	83.8	0.7	74.3	10.1	15.6	1.63	0.16
2	5.3	3.9	76.5	3.2	74.9	9.6	15.5	1.54	0.15
3	1.5	1.5	73.9	0.8	77.8	9.9	12.3	1.53	0.12
4	5.1	4.1	72.5	0.7	77.2	9.7	13.1	1.51	0.13
5	1.0	11.6	64.2	1.1	83.2	8.8	8.0	1.27	0.07
6	6.7	6.4	56.4	0.5	88.7	8.8	2.5	1.19	0.02

*Примечание.* 1. W<sup>a</sup> – влага аналитическая, A<sup>d</sup> – зольность, V<sup>daf</sup> – выход летучих веществ, S<sub>t</sub><sup>d</sup> – общая сера, daf – сухое беззольное состояние образца. 2. Здесь и в табл. 2., на рис. 1 образцы: 1 – чарчикский, 2 – середейский, 3 – соболевский, 4 – будаговский, 5 – барзасский, 6 – таймыльерский,

ТАБЛИЦА 2

Петрографический состав образцов сапропелитовых углей

Код образца	Микрокомпонентный состав, %			R <sub>о,г</sub> , %	
	Липтинит (альгинит)		Витринит		
	ТА	КА			
1	50	25	23	2	0.27
2	83	8	8	1	0.33
3	6	70	24	–	0.29
4	5	87	8	–	0.37
5	6	85	8	1	0.35
6	44	43	13	–	0.42

*Примечание.* 1. ТА – талломоальгинит, КА – коллоальгинит, R<sub>о,г</sub> – показатель отражения витринита. 2. Обозн. образцов см. табл. 1.

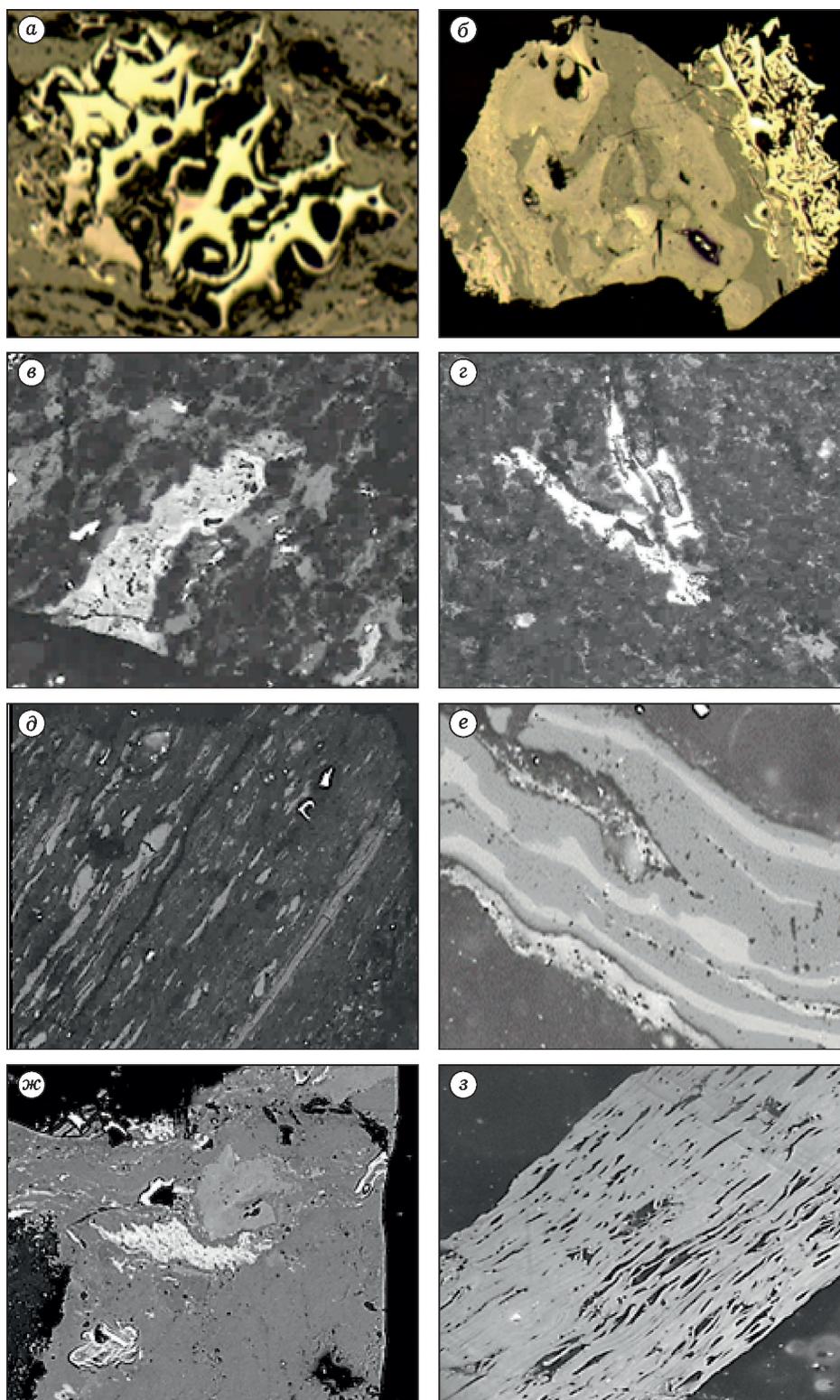


Рис. 1. Микрофотографии поверхности аншлифов (отраженный свет, масляная иммерсия, ув. 300) исследованных сапропелитовых углей с различными петрографическими мацералами: а – образец 2 (фюзинит с клеточной структурой разной степени сохранности); б – образец 3 (фюзинит, макринит); в – образец 2 (талломоальгинит с витринитом); г – образец 1 (фрагмент окисленного витринита в талломоальгините); д – образец 4 (коллоальгинит ориентированный вдоль слоистости); е – образец 5 (скопление липоидных компонентов с мелкими фрагментами витринита); жс – образец 1 (коллинит с линзами телинита, инертинита и липтинита); з – образец 6 (переслаивание коллинита липтинитом). Обозн. образцов см. табл. 1.

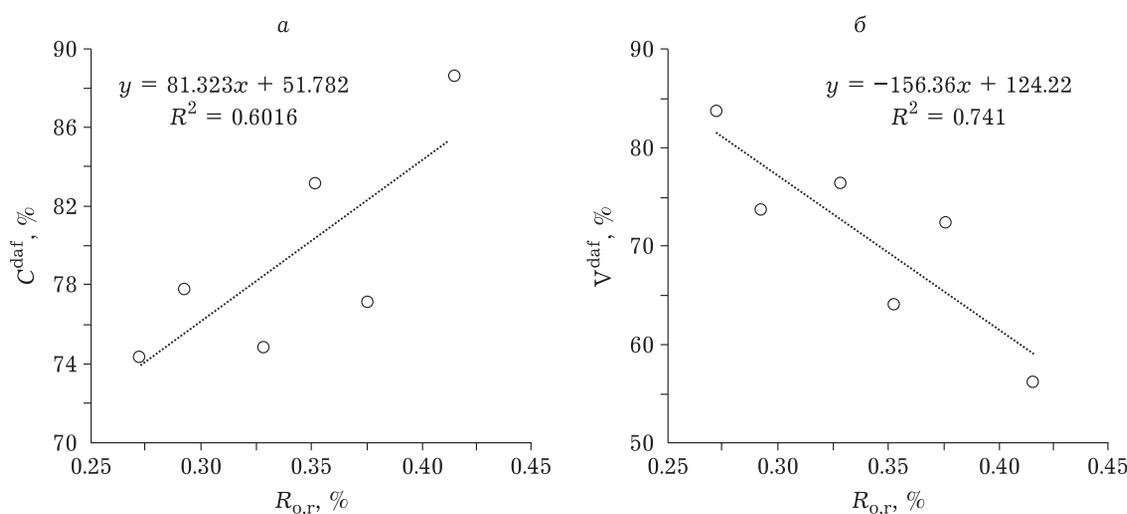


Рис. 2. Взаимосвязь между показателем отражения витринита сапропелитовых углей ( $R_{o,r}$ ) и содержанием углерода (а) в их органической массе и выходом летучих веществ (б).

единяет микрокомпоненты, образованные из наиболее устойчивых и богатых липидами (жиры, воски, смолы) водорослями и, следовательно, содержит максимальное количество водорода. В зависимости от сохранности анатомического строения они подразделяются на структурные (талломоальгинит), с более или менее хорошо выраженной ячеистой или комковатой структурой, и бесструктурные (коллоальгинит) – продукт глубокого их разложения [2, 13, 18–20].

В отраженном свете талломоальгинит – темно-серый, может иметь различную степень сохранности первоначального строения растительных остатков – от колоний с характерными для определенного рода водорослей очертаниями и четко различимыми контурами в виде овальных и веретенных телец, лишенных внутренней структуры [2, 13]. Обычно это тельца с неоднородным комковатым строением (см. рис. 1, в, з).

Коллоальгинит представляет собой бесструктурную сапропелевую основную массу, цементирующую форменные элементы и минеральные примеси, образуется он за счет ослизнения низших водорослей. Цвет его в отраженном свете, как и у талломоальгинита, темно-серый [2, 13] (см. рис. 1, д).

Наибольшее количество микрокомпонентов группы альгинита выявлено в образце 2 с шахты Середейской (91 %), а также в образцах Будаговского (92 %) и Барзасского (91 %) месторождений (см. табл. 2). Наибольшее количество талломоальгинита (ТА) определено в середейском сапропелите. В образцах углей Будаговского, Соболевского и Барзасского месторождений преобладает

коллоальгинит (КА). При этом в образце Барзасского месторождения в небольшом количестве наблюдаются липтинитовые микрокомпоненты, представленные кутикулами темно-серого цвета и спорами (см. рис. 1, е).

Группа мацералов витринита в основном представлена коллинитом в виде бесструктурной массы, цементирующей все другие мацералы (см. рис. 1, ж, з). Наибольшее количество витринита определено в образцах Чарчикского (23 %) и Соболевского месторождений (24 %). Показатель отражения витринита ( $R_{o,r}$ ) в образцах варьируется в относительно узком диапазоне от 0.27 % (образец 1, Чарчикское месторождение) до 0.41 % (образец 6, Таймыльское месторождение) (см. табл. 2).

Известно, что рост степени зрелости сапропелитов и горючих сланцев связан с увеличением содержания углерода в их органической массе [20–22]. Установленную отражательную способность витринита в исследованных образцах сопоставили с содержанием углерода  $C^{daf}$  и выходом летучих веществ  $V^{daf}$  (рис. 2). Графический анализ выявил корреляционную связь ( $R^2 = 0.6–0.7$ ) между сопоставленными параметрами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование петрографического состава шести образцов сапропелитовых углей, отобранных на различных месторождениях России. Исследованные образцы являются малосернистыми и характеризуются повышенными зна-

чениями выхода летучих веществ (56.4–83.8 %) и атомного отношения Н/С (1.19–1.63).

Визуальный анализ аншлифов позволил определить мацеральный состав исследованных углей. Установлено, что содержание мацералов группы липтинита в образцах превышает 75 %, мацералов группы витринита – от 8 до 24 %, группа инертинитов содержится в минорных количествах – не более 1–2 %.

Для определения генетической зрелости исследованных сапропелитов использовали отражательную способность витринита. Установлено, что показатель отражения витринита ( $R_{o,r}$ ) в образцах варьируется в относительно узком диапазоне – от 0.27 % (образец 1, Чарчикское месторождение) до 0.41 % (образец 6, Таймыльское месторождение). Увеличение показателя отражения витринита в образцах сапропелитов связано с изменением химического состава и технологических свойств их органической массы. Показано, что с ростом  $R_{o,r}$  увеличивается содержание углерода, снижаются выход летучих веществ, а также атомное отношение Н/С.

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).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Штах Э., Маковски М.-Т., Тейхмюллер, Тейлор Г., Чандра Д., Тейхмюллер Р. Петрология углей. М.: Мир, 1978. 554 с.
- 2 Жемчужников Ю. А., Гинзбург А. И. Основы петрологии углей. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 185 с.
- 3 Бодоев Н. Н. Сапропелитовые угли. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-е, 1991. 120 с.
- 4 Semenova Z. V., Smirnov N. I., Bochkarnikova E. A., Ptashkin O. E. Hydrogenation of sapropelite of various Siberian deposits // *Химия тв. топлива*. 1997. No. 3. С. 70–75.
- 5 Патраков Ю. Ф., Федяева О. Н., Федорова Н. И., Горбунова Л. В. Влияние ультратонкого измельчения углей в Н-донорном растворителе на их способность к термическому растворению // *Химия тв. топлива*. 2006. № 3. С. 24–32.
- 6 Патраков Ю. Ф., Федорова Н. И., Павлуша Е. С. Термическое растворение механоактивированного барзасского сапропелитового угля бензолом в сверхкритических условиях // *Химия тв. топлива*, 2011. № 4. С. 32–37.
- 7 Зыков И. Ю., Дудникова Ю. Н., Козлов А. П., Федорова Н. И., Исмагилов З. Р. Адсорбционные характеристики углеродных сорбентов из природноокисленного барзасского угля // *Химия уст. разв.* 2017. Т. 25, № 6. С. 621–625.
- 8 Король И. С., Савельев В. В., Головкин А. К. Состав растворимого органического вещества горючего сланца богхед (месторождение Таймыльское) // *Вестн. Том. гос. ун-та. Химия*. 2017. № 9. С. 6–14.
- 9 Кузнецов Д. Т. Горючие сланцы мира. М.: Недра, 1975. 368 с.
- 10 Патраков Ю. Ф., Федорова Н. И. Характеристики горючего сланца и богхеда Оленекского района Ленского бассейна // *Химия тв. топлива*. 2009. № 3. С. 3–8.
- 11 Воробьев Б. М. Уголь мира. Т. III. М.: Горная книга, 2013. 752 с.
- 12 Уланов Н. Н. Состав, свойства и возможные пути нетопливного использования углей Барзасского месторождения // *Химия тв. топлива*. 1992. № 5. С. 17–25.
- 13 Фомин А. Н. Углепетрографические исследования в нефтяной геологии. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1987. 166 с.
- 14 Fomin A. N. On the nature of barzassite (Summary) // *Oil Shale*. 1990. Vol. 7, No. 1. P. 36–41.
- 15 Стукалова И. Е., Сыкорова И., Мах К. Петрографические типы бурых углей // *Изв. вузов. Геология и разведка*. 2012. № 1. С. 27–33.
- 16 Sýkorová I., Pickel W., Christanis K., Wolf M., Taylor G. H., Flores D. Classification of huminite – ICCP System 1994 // *Int. J. Coal Geol.* 2005. Vol. 62. P. 85–106.
- 17 Pešek J., Sýkorová I. A review of the timing of coalification in the light of coal seam erosion, clastic dykes and coal clasts // *Int. J. Coal Geol.* 2006. No. 66. P. 13–34.
- 18 Мингареев Р. Ш., Тучков И. И. Эксплуатация месторождений битумов и горючих сланцев. М.: Недра, 1980. 572 с.
- 19 Столбова Н. Ф., Исаева Е. Р. Петрология углей. Томск: Изд-во ТПУ, 2013. 77 с.
- 20 Богородская Л. И., Конторович А. Э., Ларичев А. И. Кеороген: Методы изучения, геохимическая интерпретация. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал “Гео”, 2005. 254 с.
- 21 Bhowmick T., Nayak B., Varma A. K. Chemical and mineralogical composition of Kathara coal, East Bokaro coalfield, India // *Fuel*. 2017. Vol. 208. P. 91–100.
- 22 Hackley P. C., Cardott B. J. Application of organic petrography in North American shale petroleum systems: A review // *Int. J. Coal Geol.* 2016. No. 163. P. 8–51.