

УДК 539.143.43:552.547

Е.В. Ульянова

О КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ВЕРОЯТНОСТЬЮ ГДЯ И НАЛИЧИЕМ МИНЕРАЛЬНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В УГЛЯХ

ИФГП НАН Украины

По наслідкам дослідження мессбауеровських спектрів вугілля зроблено припущення, що формування викиднебезпечних зон вугільних пластів викликано наявністю у вугільній масі двовалентних сполук заліза.

Ключові слова: вугілля, викиднебезпечна зона, рентгенофлуоресцентний аналіз, мессбауерівська спектроскопія, двовалентні сполуки заліза

E.V. Ulyanova

ON THE CORRELATION BETWEEN OUTBURST PROBABILITY AND MINERAL INCLUSIONS IN COAL

Coal's Mossbauer spectra analysis results allow assuming ferrous iron inclusions in coals as the factor of outburst hazardous areas formation.

Keywords: coal, outburst hazardous zone. Mossbauer spectroscopy, X-ray Fluorescence analysis, ferrous compounds

Введение

Внезапные выбросы угля и газа зависят от многих одновременно действующих факторов – горного давления, содержащегося в угле газа, физических и механических свойств угля [1–9]. Сочетание действующих факторов для каждого случая может быть различным. Существующие сейчас нормативные способы прогноза выбросоопасности учитывают лишь косвенные характеристики угольных пластов – давление газа в пласте, прочность угля на разрыв, начальную скорость газовыделения, параметры сейсмической активности угольного пласта, показатель разрушаемости угля, степень метаморфизма, логарифм удельного электрического сопротивления угля, деформационные характеристики угля, температурный градиент [8]. Кроме того, оценка степени влияния большей части факторов производится только после происшедшего газодинамического явления (ГДЯ). Поэтому для разработки выбросоопасных пластов применяют в основном режим сотрясательного взрывания. Это увеличивает себестоимость угля на 30–50%. Однако площадь выбросоопасных зон составляет не более 3–6% общей площади пласта. Для уменьшения затрат на добычу угля и одновременно повы-

шения точности прогноза выбросоопасных зон важно определять такие зоны заранее. Цель работы – установить, что именно в угольной структуре способствует возникновению выбросоопасной ситуации.

Состояние вопроса

В условиях естественного залегания угольные пласты – это сложные термодинамически сбалансированные природные системы, где структура угольного вещества, включенные в нее флюиды и минеральные примеси оказывают существенное, часто решающее влияние на поведение пластов при их разработке.

Структура угля до сих пор вызывает споры. Являясь сложным органическим веществом, он изменяет свой элементный состав и свойства от марки к марке. С ростом степени метафорфизма (увеличение углерода от 75 до 96%) физико-механические свойства изменяются не монотонно, а имеют экстремумы на всех зависимостях в районе средней (88–90%) стадии метаморфизма. Кроме того, уголь одной марки в пределах пласта может отличаться по сорбционным свойствам (содержанию воды, метана и кинетики десорбции), по способности к выбросам, к самовозгоранию. Поэтому создать модель угольного вещества, удовлетворительно объясняющую изменения всех свойств углей, особенно их склонность к выбросам, важно, но очень сложно.

Использование таких методов, как инфракрасная (ИК) спектроскопия и электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), позволило обнаружить увеличение метильных групп (CH_3 -) и концентрацию парамагнитных центров (ПМЦ) в выбросоопасных зонах [10–14]. Это было объяснено действием геологических нарушений. Однако, по мнению тех же авторов, 90% геологических нарушений не выбросоопасны [13,14], да и выбросы происходят не только в местах геологических нарушений. Очевидна необходимость учитывать причины, заложенные в самой угольной структуре.

Применяя ядерный магнитный резонанс (ЯМР) и мессбауэровскую спектроскопию (ядерный гамма-резонанс), мы получили данные, позволяющие существенно продвинуться в решении глобальных проблем – определении выбросоопасных зон угольных пластов [15–21]. Проведенные исследования показали, что в выбросоопасной зоне возрастает количество сорбированных углем флюидов, что хорошо контролируется по спектрам ЯМР [18–21]. Ширина узкой составляющей линии ЯМР спектров ΔH_1 от сорбированного метана меняется в зависимости от марки угля. Связано это с тем, что сорбционные свойства углей разных марок отличаются друг от друга. Численное значение ΔH_1 уменьшается с ростом степени метаморфизма. В пределах одной марки угля, при равном процентном содержании метана, значения ΔH_1 узких компонент ЯМР-спектров одинаковы. Это относится к углям спокойных невыбросоопасных зон, в выбросоопасных зонах ΔH_1 возрастает [21]. Так, ΔH_1 узкой составляющей ЯМР-спектра для метанонасыщенного угля марки Т из выбросоопасной зоны увеличивается на ~13%, для марки К – на ~16%. Подобное явление попробуем объяснить, используя данные исследований, проведенных

с помощью мессбауэровской спектроскопии [18,20,22]. Они показали, что в угле выбросоопасной зоны увеличивается степень мономеризации структуры. Это вызывает появление новых адсорбционных центров, за счет которых повышается энергия сорбционных взаимодействий.

Содержание в ископаемых углях железа от 1 до 2,67% [23] достаточно для применения мессбауэровской спектроскопии. Первые исследования сводились в основном к регистрации в углях высокодисперсных железистых минералов [24–27], из которых наиболее распространенным является пирит FeS_2 . Но железо встречается и в форме оксидов и карбонатов типа сидерита FeCO_3 [24], розенита $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, мелантерита $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ [25] и слюдоподобных глинистых минералов, содержащих железо (иллит). Так называемое органически связанное железо обнаруживается в угле в форме порфиринов, белкоподобных структур [26], ацетата железа $\text{Fe}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$ [25] и железа, связанного с карбоксильными группами [27]. Тип соединений железа и их количество зависят от марки угля, пласта и угольного бассейна.

Мессбауэровский спектр угля состоит из комбинации двух или трех дублетов с различными квадрупольными расщеплениями и химическими сдвигами. Дублет с малым квадрупольным расщеплением и сдвигом относится к пириту (FeS_2 – трехвалентное железо), а дублет с большим значением квадрупольного расщепления и сдвига – к двухвалентному железу. Квадрупольное расщепление определяется как расстояние между вершинами пиков дублетов, химический (изомерный) сдвиг взят относительно нитропрусида натрия. Из мессбауэровских спектров может быть получена достоверная информация о валентном состоянии мессбауэровского иона и его количества [22].

Эксперименты и обсуждение результатов

Нами был проведен контроль содержания железа в угольном веществе пласта h'_6 – «Смоляниновский» (марка К) шахты им. А.А. Скочинского. Пласт h'_6 сложного строения, особо опасен по внезапным выбросам угля и газа, плотность угля $1,44 \text{ т/м}^3$. Зольность A^{daf} – 19,6%, влажность W – 1,9%, сера S^{daf} – 1,1%, выход летучих V^{daf} – 31,0%. Природная газоносность 20–30 $\text{м}^3/\text{т.с.б.м.}$, газообильность 70 $\text{м}^3/\text{т.}$ Угольные пробы отбирали в виде штыба весом 0,5 – 0,8 кг при бурении 2 скважин на глубину 2,4 м в кутках. Отбор проб производили через каждые 4 м подвигания забоя штрека по простиранию. Последовательный отбор проб в процессе отработки выбросоопасного пласта был необходим для исследования изменений, происходящих в угольной структуре в зависимости от природной метаноносности и зон ГДЯ. Отбор образцов проводили в течение месяца. За это время официально было зарегистрировано два ГДЯ. Первое, произошедшее 14 марта, было квалифицировано как отжим угля с повышенным газовыделением, второе (19 марта) – как внезапный выброс угля и газа. Все угольные образцы исследовали на рентгенофлуоресцентном (РФ) спектрометре ElvaX для определения присутствия в них железа. Проведенный РФ-анализ показал, что образцы из спокойных областей содержат необычайно малый процент железа (рис. 1).

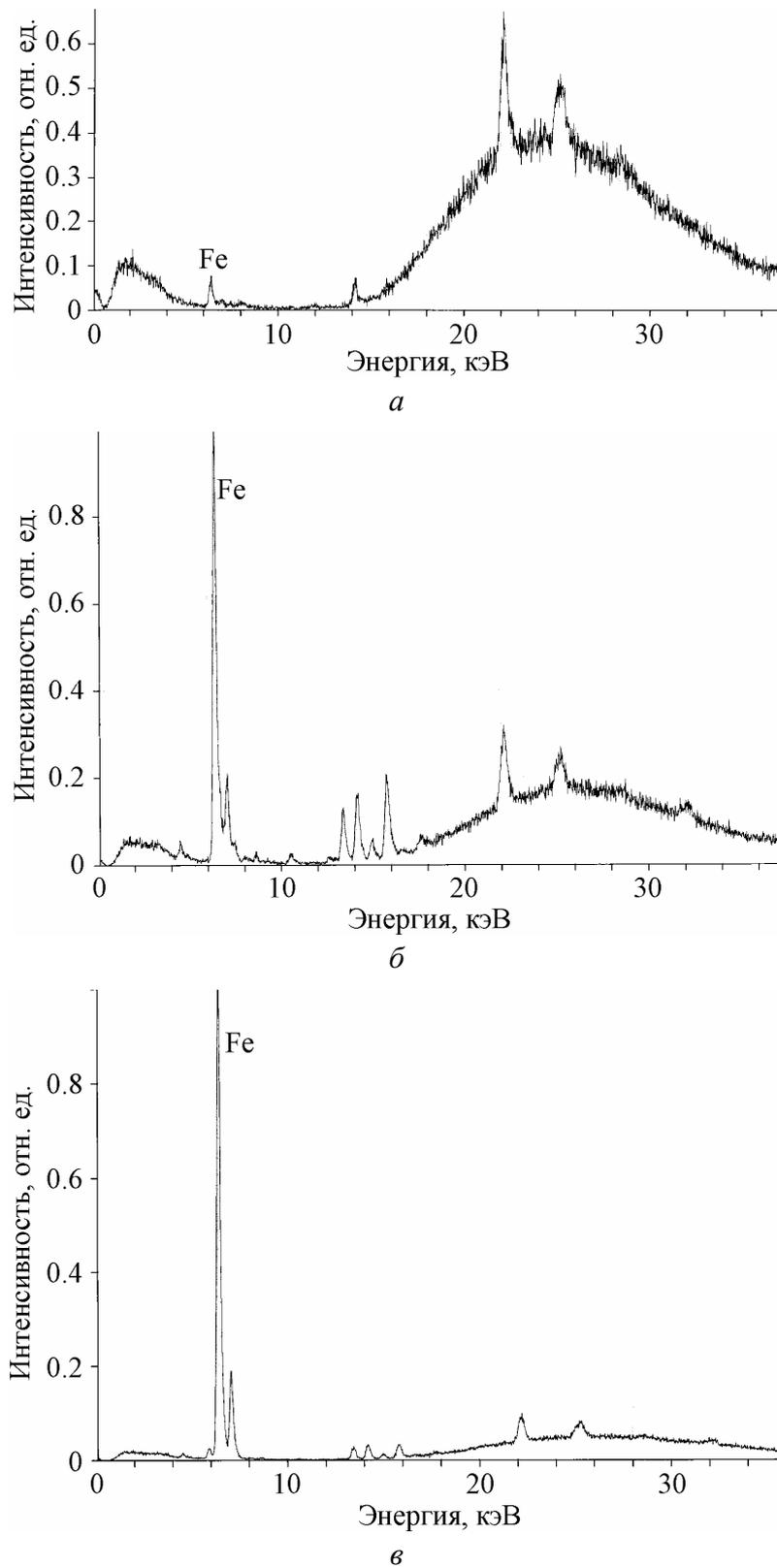


Рис. 1. Рентгенофлуоресцентные спектры образцов: *a* – № 6 из спокойной области; *б* – №25 из зоны ГДЯ, происшедшего 14.03.2009 г.; *в* – № 34,36 из зоны ГДЯ, происшедшего 19.03.2009 г.

На рис. 1 большое гало справа (начиная от 16 кэВ) – это фон, создаваемый прибором. Он тем больше (0,4 отн.ед.), чем меньше вклад от железа (0,065 отн.ед.). Дублет железа на спектре образца из спокойной области (рис. 1,а) расположен на спектре слева (6–7 кэВ), дублет, находящийся справа (14 кэВ), дает небольшое количество стронция.

Судя по спектру, приведенному на рис. 1,б, в выбросоопасной зоне количество железа возрастает на порядок. В образцах № 34 и 36, взятых непосредственно из выбросов, количество железа еще увеличилось (рис. 1,в). Так как интенсивность фона на рис. 1,в уменьшилась в три раза, можно предположить увеличение количества железа тоже в три раза. К сожалению, провести количественный анализ пока не представилось возможным. Для этого необходимо иметь эталон. Кроме железа, в образцах из выбросоопасных зон содержится титан (4 кэВ), цинк (9), мышьяк (11), довольно много рубидия (13), стронция (14) и циркония (16 кэВ) (рис. 1,б,в). В образцах № 34,36 появился дублет от иттрия (15 кэВ). В образцах № 33 и 35 (ГДЯ, 19 марта) присутствуют также медь и бром.

Достоинством РФ-анализа является возможность получить очень быструю информацию о присутствии железа в образце и его сравнительном количестве (время записи спектра 5 мин). Однако РФ-анализ не показывает, какими соединениями это железо представлено. Для определения валентности железа (характеризующей соединение) были проведены исследования образцов на мессбауэровском спектрометре фирмы WISSEL в Институте металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАНУ. Как показали исследования, большая часть железа находится в двухвалентном состоянии. Трехвалентное железо – это пирит (FeS_2) или может присутствовать марказит (который отличается от пирита типом кристаллической решетки). Присутствие трехвалентного железа во всех образцах минимально, и только в образце № 33 оно достигает 83% от общего содержания соединений железа. В образцах № 25,34,36 обнаружено большое количество двухвалентного железа. Это дает возможность предполагать, что выброс произошел не только 19.03.2009 г., но и ГДЯ 14.03.2009 г. (квалифицированное как отжим) также было выбросом.

Ранее нами был проведен контроль содержания железа и его валентности при отработке выбросоопасного пласта «Прасковиевский» шахты «60 лет Советской Украины» (марка К) [18,20]. Образцы отбирались каждые 5 м по мере разработки пласта. Анализ мессбауэровских спектров показал присутствие пирита и двух типов соединений с двухвалентным железом. В таблице показано изменение соотношения интенсивностей трех компонент двух- и трехвалентного железа, содержащегося в исследованных угольных образцах.

Так же, как и спектры угля пласта «Смоляниновский», спектры пласта «Прасковиевский» в пределах его спокойных участков существенно не различаются. В угле, отобранном за 14 ч до выброса (вход в выбросоопасную зону), в полтора раза возрастает общая доля двухвалентного железа по сравнению с трехвалентным, а в выброшенном угле количество трехвалентного

железа уменьшилось примерно в три раза. Кроме того, в выброшенном угле и в угле выбросоопасной зоны изменилось соотношение интенсивностей разных типов двухвалентного железа, а также зафиксировано изменение химического состава железа.

Таблица

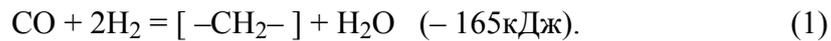
Параметры сверхтонкой структуры ЯГР-спектров образцов угля пласта «Прасковиевский»

Угольные образцы	Fe (+2)/Fe(+3) $(S_{\text{I}} + S_{\text{II}})/S_{\text{III}}$	$S_{\text{II}}/S_{\text{I}}$
Спокойный участок	1,83	2,05
Выбросоопасная зона	2,67	0,26
Выброс	4,06	0,38
	5,53	0,18

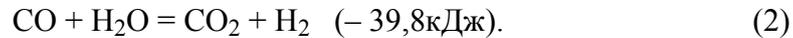
Нами было высказано предположение [18,20,22], что изменение величины отношения $(S_{\text{II}}/S_{\text{I}})$ свидетельствует об увеличении количества мессбауэровских зондов с большей степенью локального искажения в процессе выброса. Если предположить, что уголь до выброса представляет собой набор регулярных полимерных структур, а железо входит в органические соединения, то под влиянием высоких давлений происходит разрыв полимерных цепей и увеличение степени мономеризации структуры. При этом величина квадрупольного расщепления должна возрасти, так как повышаются локальные искажения. Основанием для подобной аналогии могут служить мессбауэровские исследования полимерных металл-органических соединений типа полиферроцена [28]. Согласно этим исследованиям квадрупольное расщепление мономерных производных ферроцена меньше, чем полиферроцена, структура которого имеет сетчатый характер. Разрыв полимерных цепей вследствие высокого горного давления должен сопровождаться выделением газообразных углеводородов, которые и создают восстановительную атмосферу. Это обстоятельство может являться причиной увеличения в процессе выброса количества двухвалентного железа, обнаруживаемого в мессбауэровских спектрах.

Однако после обсуждения возможных механизмов преобразования угольного вещества при совместной работе с О.Н. Разумовым (сотрудником Института металлофизики им. Г.В Курдюмова НАНУ) мы предположили существование в угле процесса, при котором двухвалентное железо, являясь катализатором, способствует синтезу насыщенных и ненасыщенных углеводородов алифатического ряда. Фишером и Тропшем был открыт прямой синтез углеводородов из оксида углерода и водорода на железных катализаторах [29]. При нагреве до 180–200°C смеси CO и H₂ в присутствии катализатора при атмосферном давлении синтезируются насыщенные и ненасыщенные углеводороды алифатического ряда.

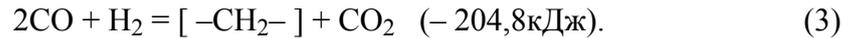
Первая основная реакция – собственно синтез Фишера–Тропша:



Вторая основная реакция – равновесие водяного газа; этот процесс особенно легко протекает на железных катализаторах как вторичный:



С учетом этой вторичной реакции для ФТ-синтеза на железных катализаторах получается суммарное уравнение :



Реакции (1) и (3) при стехиометрическом, исчерпывающем превращении позволяют получить максимальный выход 208,5 г углеводородов на 1м³ смеси (CO + H₂) при образовании только олефинов.

Реакция (2) может подавляться при низких температурах малым временем контакта, циркуляцией газа и удалением воды из циркулирующего газа, так что синтез может протекать частично по уравнению (1) с образованием воды и частично по уравнению (3) с образованием углекислого газа.

Образование углеводородов из CO₂ и H₂ обусловлено реакцией, обратной к реакции (2):



Реакции сопровождаются образованием метана, что происходит в соответствии с уравнением



Можно предположить, что в угольном пласте с ростом локальной температуры, вызванной какими-либо причинами (например, во время зарождения геологических нарушений), происходит начало реакций синтеза вблизи катализатора. Далее процесс поддерживается за счет экзотермических реакций ФТ-синтеза. Медь облегчает восстановление железа и снижает температуру процесса до 150°С. При этом скорость ФТ-синтеза увеличивается.

Синтез тяжелых углеводородов при низких температурах (50–200°С) может изменять марку угля, добавляя алифатические компоненты в местах ФТ-синтеза. Особое значение эти процессы имеют в связи с тем, что катализатор чаще всего сосредоточивается в прослойках угля. Поэтому появление тяжелых углеводородов (пропана, бензола, парафина и других жирных кислот) при низких температурах синтеза вблизи сосредоточения катализатора радикально снижает сдвиговую прочность угля и способствует повышению выбороопасности без существенного увеличения внутрипластовой концентрации метана и соответственно без повышения давления газов в пласте.

В подтверждение такого предположения можно привести следующие аргументы. В выбороопасных зонах повышается процент летучих. Это показано нашими исследованиями и результатами других авторов [12,30–32]. В химии угля существует понятие «восстановленность углей». Исследования

показали, что не все угли, имеющие одинаковый петрографический состав и стадию метаморфизма, идентичны по другим показателям. Выделены два типа углей, различающиеся по нескольким характеристикам [12, 30]. Уголь первого типа имеет более темную оранжевую органическую массу, содержит меньше водорода и серы, больше углерода и азота; у него ниже $H_{ат}/O_{ат}$ и $H_{ат}/C_{ат}$. Он имеет более низкие показатели выхода летучих веществ, спекаемости, растворимости и теплотворной способности, более высокую микротвердость и больше парамагнитных центров.

Уголь второго типа отличается более светлой оранжевой основной массой. В нем выше содержание водорода, углерода и серы, меньше кислорода, выше $H_{ат}/O_{ат}$ и $H_{ат}/C_{ат}$, более высокий выход летучих, выше растворимость, спекаемость, теплотворная способность, меньше микротвердость и количество парамагнитных центров. В составе минеральных компонентов этих углей присутствует тонкодисперсный пирит, а в золе основные окислы преобладают над кислыми [31]. Этот тип углей получил название восстановленного (в), поскольку в них больше водорода и меньше кислорода. По данным многих авторов, в выбросоопасных зонах преобладают угли восстановленного типа [30 – 34], содержащие повышенное количество углеводородов алифатического ряда. Реакции ФТ-синтеза хорошо объясняют существование восстановленных углей в выбросоопасных зонах.

Выводы

Результаты анализа мессбауэровских спектров углей позволяют предположить, что появление выбросоопасных зон в углях связано с присутствием в них двухвалентного железа.

Автор выражает искреннюю благодарность чл.-кор. НАНУ А.Д. Алексееву за полезные замечания, сотруднику Института металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАНУ О.Н. Разумову за совместную работу и обсуждения.

Работа выполнена в рамках проекта УТНЦ, № 4202.

1. *Ходот В.В., Яновская М.Ф., Перемыслер В.С.* Физико-химия газодинамических явлений в шахтах. – М.: Наука, 1978. – 139 с.
2. *Мальшев Ю.Н., Трубецкой К.Н., Айруни А.Т.* Фундаментально прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов. – М.: Изд-во Акад. горных наук, 2000. – 519 с.
3. *Ходот В.В.* Источники энергии возбуждения внезапных выбросов угля и газа // Выбросоопасность угольных пластов. – Научн. сообщения ИГД им. А.А. Скочинского. – 1990, вып. 186. – С. 8–20.
4. *Ходот В.В.* Внезапные выбросы угля и газа. – М.: ГНТИП, 1961. – 362 с.

5. *Петухов И.М., Линьков А.М.* Механика горных ударов и выбросов. – М.: Недра, 1983. – 280 с.
6. *Айруни А.Т.* Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в шахтах. – М.: Наука, 1987. – 310 с.
7. *Забигаило В.Е., Николин В.И.* Влияние катагенеза горных пород и метаморфизма углей на их выбросоопасность. – К.: Наукова думка, 1990. – 168 с.
8. *СОУ 10.1.00174088.011 – 2005* «Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ», Мінвуглепром України. – К., 2005. – 224 с.
9. *Агафонов А.В.* Способы и средства обеспечения безопасности проведения подготовительных выработок по выбросоопасным пластам. – Донецк: Донбасс, 1999. – 238 с.
10. *Фролков Г.Д., Фандеев М.И., Малова Г.В. и др.* Влияние природной механоактивации на выбросоопасность углей // ХТТ. – 1997. – №5. – С. 22–33.
11. *Фролков Г.Д. и др.* О влиянии напряженно-деформированного состояния угольного пласта на структуру органической массы и газовыделения при внезапных выбросах угля и газа. – Препринт. – Ростов-на-Дону, 1992. – 16 с.
12. *Русьянова Н.Д.* Угলেখимия. – М.: Наука, 2003. – 317 с.
13. *Гагарин С.Г., Еремин И.В., Лисуренко А.В.* Структурно-химические аспекты нарушения каменных углей выбросоопасных пластов // ХТТ. – 1997. – №3. – С. 3–14.
14. *Лисуренко А.В., Гагарин С.Г., Еремин И.В.* О природе метастабильного состояния углей выбросоопасных пластов // ХТТ. – 1997. – № 5. – С. 34–43.
15. *Алексеев А.Д., Ульянова Е.В., Стариков Г.П.* Методические основы классификации газодинамических явлений // Физика и техника высоких давлений. – 1995. – №1. – С. 67–70.
16. *Алексеев А.Д., Стариков Г.П., Ульянова Е.В. и др.* Прогноз выбросоопасности при вскрытии крутых и крутонаклонных пластов // Руководящий нормативный документ. КД 12.10.05.01-99. – 2000. – 22 с.
17. *Алексеев А.Д., Зайденварг В.Е., Синолицкий В.В., Ульянова Е.В.* Радиофизика в угольной промышленности. – М.: Недра, 1992. – 184 с.
18. *Ульянова Е.В., Василенко Т.А., Биттерлих В.О. и др.* Структурные превращения в ископаемых углях при механических воздействиях // Материалы 6-й научной школы стран СНГ «Вибротехнология – 96». Ч. 2. – Одесса, 1996. – С. 39–44.
19. *Алексеев А.Д., Сереброва Н.Н., Ульянова Е.В.* Изучение сорбции метана в ископаемых углях по спектрам ЯМР высокого разрешения на ^1H и ^{13}C // ДАН УССР, серия Б. – 1989. – № 9. – С. 25–28.
20. *Поляков П.И., Ульянова Е.В., Василенко Т.А.* Изменения в структуре ископаемых углей, возникающие под действием высоких давлений // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. тр. / НАН Украины, Институт физики горных процессов. – Вып. 1. – 1998. – С. 16–23.
21. *Алексеев А.Д., Ульянова Е.В., Василенко Т.А.* Возможности ЯМР в исследовании физических процессов в ископаемых углях // Успехи физических наук. – 2005. – Т. 175, № 11. – С. 1217–1232.
22. *Ульянова Е.В., Разумов О.Н., Скоблик А.П.* Железо и его связь с накоплением метана в углях // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. тр. / НАН Украины, Институт физики горных процессов. – Вып. 9. – 2006. – С. 20–31.

23. *Curtis A., Palmer C.* Determination of twenty-nine elements in eight Argonne Premium Coal samples by instrumental neutron activation analysis // *Energy and Fuels.* – 1990. – Vol. 4. – P. 436–439.
24. *Huffman G.P., Huggins F.E.* Mossbauer studies of coal and coke: quantitative phase identification and direct determination of pyritic and iron sulphide sulphur content // *Fuel.* – 1978. – Vol. 57. – P. 437–442.
25. *Taneja S.P., Jones C.H.W.* Mossbauer studies of iron-bearing minerals in coal and coal ash // *Fuel.* – 1984. – Vol. 63. – P. 695–702.
26. *Herod A.J., Gibb T.C., Herod A.A., Xu B., Zhang S., Kandiyoti R.* Iron complexes by Mössbauer spectroscopy in extracts from Point of Ayr coal // *Fuel.* – 1996. – Vol. 75. – P. 437–442.
27. *Lefelhocz J.F., Friedel R.A., Kohman T.P.* Mössbauer spectroscopy of iron in coal // *Geochim Cosmochim Acta.* – 1967. – Vol. 31. – P. 2261–2273.
28. *Хрипунов С.В., Ксенофонтов В.Г.* Синтез металлокомплексных соединений углей в реакции образования ферроцена. Деп. ВИНТИ. – 1988. – №147. – В88. – 12 с.
29. *Фальбе Ю.* Химические вещества из угля. – М.: Химия, 1980. – 616 с.
30. *Еремин И.В., Броневец Т.М.* О параметрах восстановленности среднеметаморфизованных гумусовых углей стран – членов СЭВ // *ХТТ.* – 1983. – №4. – С. 3–10.
31. *Лифшиц М.М.* Об определении степени восстановленности каменных углей // *ХТТ.* – 1979. – №3. – С. 3–11.
32. *Маценко Г.П., Капра З.С.* Показатели отражения витринита Донецких высокометаморфизованных углей и антрацитов разных типов по восстановленности. – Сб. науч. тр. «Пути переработки углей Украины» // Под. ред. С.Н. Баранова. – К.: Наукова думка, 1988. – С. 94–97.
33. *Русьянова Н.Д., Попов В.К., Бутаков В.И.* Параметры, характеризующие изменения структуры основной органической массы углей в процессе метаморфизма. – Сб. науч. тр. Структура и свойства углей в ряду метаморфизма // Под. ред. С.Н. Баранова. – К.: Наукова думка, 1985. – С. 16–42.
34. *Савчук В.С., Кузьменко Е.А.* Влияние восстановленности углей на проявление геодинамических явлений в угольных шахтах Донбасса // *Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України.* – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 80. – С. 84–90.

Статья поступила в редакцию 12 мая 2009 года