

УДК 552.574:539.2

**МИКРОСТРУКТУРА ИСКОПАЕМЫХ УГЛЕЙ
ДО И ПОСЛЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ**

Е. В. Ульянова¹, О. Н. Малинникова¹, Б. Н. Пашичев¹, Е. В. Малинникова²

¹Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,
E-mail: ekaterina-ulyanova@yandex.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия

²Московский государственный университет геодезии и картографии,
Гороховский пер., 4, 107064, г. Москва, Россия

Показана возможность использования расчетных значений информационной энтропии для количественного описания неоднородности структуры углей на микроуровне. Расчеты проводились по цифровым изображениям поверхности углей, полученным с помощью сканирующего электронного микроскопа при тысячекратном увеличении. Рассчитанные статистические значения величин “энтропия – сложность” позволяют сравнить неоднородности структуры образцов углей, отобранных из пород внезапного выброса, зон пластов опасных и неопасных по внезапным выбросам. Установлено, что уголь выбросоопасных зон содержит области с наиболее хаотичной организацией структуры и более упорядоченные области, характерные для неопасных зон. В выброшенном угле наиболее хаотичные структуры не наблюдаются, но его структура остается менее упорядоченной, чем в образцах угля из неопасных по выбросам зон. Использование предложенного метода дает возможность по цифровым фотографиям образцов углей определить заведомо невыбросоопасные зоны пласта.

Ископаемый уголь, газодинамические явления, выбросоопасные и невыбросоопасные зоны, цифровые изображения поверхности углей, статистические энтропия и сложность

DOI: 10.15372/FTPRPI20190502

Согласно современной теории, опасность возникновения газодинамических явлений в шахтах определяют три основных природных фактора: горное давление (напряженное состояние массива горных пород), газоносность и давление газа, свойства самого массива (геологическое строение, тектоническая нарушенность, физико-механические свойства) [1, 2]. Горное и газовое давления учитываются при прогнозе газодинамических явлений, а таким свойствам угольного массива, как строение, нарушенность и минеральный состав углей, уделяется меньше внимания. Именно их особенностями можно объяснить тот факт, что внезапные выбросы угля и газа более чем в 90 % случаев происходят в зоне влияния мелкоамплитудных тектонических нарушений, но только 5–8 % таких нарушений опасны по внезапным выбросам и горным ударам [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 19-05-00824-а).

Уголь обладает сложной блочно-трещиноватой, мелкопористой, сорбирующей структурой, поэтому исследование его вещества затруднительно, как и его особенностей, приводящих к предрасположенности структуры угля к газодинамическим явлениям. Структурные и сорбционные свойства угля, формирующие выбросоопасные зоны в пласте, являются предметом дискуссий среди ученых [4 – 19]. Есть предположения, что выбросы связаны с такими факторами, как литотип угля, в частности с большим содержанием витрена и инертдетринита [14]. В [15 – 19] отмечается, что в результате ведения горных работ происходит превышение некоторого предельного уровня дефектности, что инициирует деструкцию связей по свободно-радикальному механизму, названному механохимической деструкцией, и способствует образованию выбросоопасных зон. Начальный энергетический импульс, необходимый для инициирования механохимических превращений, система получает при изменении природного равновесного напряженного состояния. В [20, 21], используя концепцию иерархической нарушенности геоматериалов, показана связь фрактальных и мультифрактальных параметров структуры каменных углей с их предрасположенностью к газодинамическим явлениям. Таким образом, роль структурных особенностей углей в формировании выбросоопасности пласта до сих пор изучается.

За последние 20 лет предложены различные методы выделения анизотропных объектов: направленные и комплексные вейвлеты, курвлеты, а также шиарлет-преобразования данных. Шиарлеты обладают набором характеристик, выгодно выделяющих их на фоне других функций, используемых для аналогичной обработки изображений: конечное число порождающих функций; оптимальное представление анизотропных характеристик анализируемых данных; быстрая алгоритмическая реализация; единый подход к разложению непрерывных и дискретных данных [22]. Алгоритмические расчетные схемы шиарлет-преобразования опираются на разработанную теорию вейвлет-анализа и являются ее естественным расширением.

В [23] предложен метод оценки пространственной сложности 2D-паттернов (неоднородностей), основанный на пермутационной энтропии, изначально введенной для 1D-сигналов [24], и на величине статистической сложности, определяемой как произведение относительного расхода Йенсена – Шеннона и относительной энтропии, подхода, разработанного в [25].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для описания роли микроструктуры в формировании выбросоопасных зон в угольном пласте применялся метод расчета, основанный на распределениях коэффициентов шиарлет-разложения цифрового изображения поверхности угля и расчете диаграмм пространственной “энтропии – сложности”. Метод позволяет исследовать неоднородности строения углей по цифровым изображениям их поверхности [26], оценивать энтропию и сложность локально, в отличие от алгоритма пермутационной энтропии, для которого в двумерном пространстве требуются большие выборки [24].

Исследовались цифровые изображения поверхности угольных образцов естественной формы, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV, с паспортным разрешением не хуже 10 нм для вторичных электронов. В настоящей работе изучались образцы угля из выбросоопасной и невыбросоопасной зон пласта и угли внезапного выброса.

Оценка пространственной сложности и энтропии для двумерных изображений состоит из двух этапов. На первом проводится разложение цифрового изображения на коэффициенты, характеризующие локальную анизотропию и ориентацию основных структур. Используются стандартные программы, включающие выбор матриц масштабирования и сдвига и параметров переноса для формирования исходной шиарлет-функции, позволяющей провести свертку данного изображения с масштабируемыми, сдвинутыми и смещенными копиями исходной шиарлет-функции. Дискретное шиарлет-преобразование — отображение исходного изображения во множество шиарлет-коэффициентов, определяющих распределение вероятности локальных шиарлет-признаков на изображении P_i , т. е. вероятности нахождения структуры с индексом i в исследуемом паттерне ($i = 1, \dots, N$ — разные масштабы и ориентации элементов структуры в соответствии с разными коэффициентами шиарлет-преобразования).

На следующем этапе для полученного распределения находится относительная $S[P]$ и нормализованная энтропия Шеннона $S^N[P]$. Энтропия — мера хаотичности системы, чем меньше паттерны (элементы) системы подчинены какому-либо порядку, тем выше энтропия:

$$S[P] = -\sum \log_2 P_i, \quad S^N[P] = \frac{S[P]}{S[P_e]},$$

здесь $S[P_e] = \log_2 N$ — энтропия равновероятного распределения P_e , в котором все шиарлет-признаки представлены с вероятностью $P_i = 1/N$.

Наблюдаемое распределение сравнивается с равновероятным, на основании чего вводится понятие статистической сложности C , как произведение энтропии на расхождение между наблюдаемым P и равновероятным распределением P_e шиарлет-признаков:

$$C = J[P, P_e] \frac{S[P]}{S[P_e]},$$

где $J[P, P_e]$ — расстояние между двумя распределениями; $P, P_e: \{P_i = 1/N \mid \forall i = 1, \dots, N\}$ — наблюдаемое и равновероятное распределения.

Возможны несколько формулировок для описания расстояния между двумя распределениями. Использовалось симметризованное расстояние Кульбака–Лейблера, известное как расхождение Йенсена–Шеннона [27]:

$$J[P, P_e] = S\left[\frac{P + P_e}{2}\right] - \frac{1}{2}(S[P] + S[P_e]).$$

Пространственный паттерн (повторяющийся элемент структуры) поверхности угля описывается как точка на плоскости в координатах “энтропия–сложность”, где нулевая энтропия и сложность соответствуют регулярной структуре, а высокая энтропия и нулевая сложность — случайному пространственно независимому шуму (рис. 1) [28].

Так как нулевой сложности соответствуют максимально упорядоченные структуры и полностью хаотичные, а структура угля не бывает абсолютно упорядоченной, то экспериментальных точек, лежащих в левой нижней части графиков диаграмм “энтропия–сложность” (низкая энтропия, низкая сложность), быть не должно. Но можно получить точки, соответствующие полностью хаотическому распределению структур в образце, в правой нижней части диаграмм, т. е. при низкой сложности, но высокой энтропии и на средних участках диаграмм.

Расчеты проводились с использованием стандартных библиотек языка Python для научных расчетов и визуализации (scipy, matplotlib), библиотеки для шиарлет-разложения в PyShearlets, а также программного обеспечения разработки на языке Python [26].

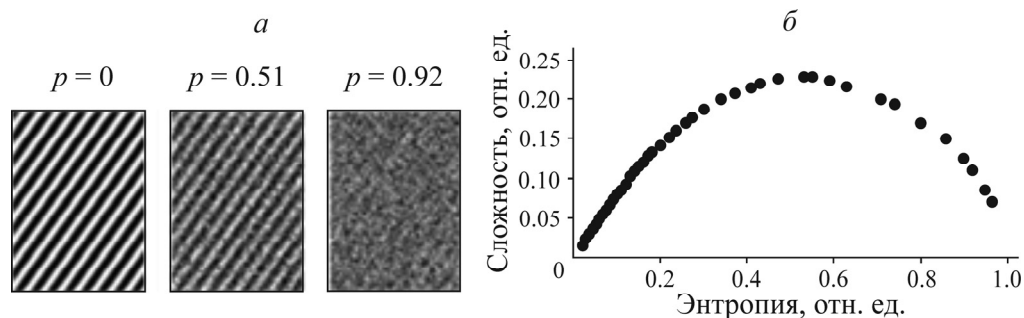


Рис. 1. Постепенное разрушение паттерн-узора полос: *a* — изображения с различной вероятностью пикселей p ; *б* — эволюция энтропии и сложности в зависимости от разрушения паттерна

ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛЕЙ ИЗ ЗОН РАЗЛИЧНОЙ ВЫБРОСООПАСНОСТИ

Цифровые изображения угольных образцов, полученные с тысячекратным увеличением, считаются наиболее информативными при обнаружении различий в структуре углей, связанных с их склонностью к газодинамическим проявлениям. Это обусловлено тем, что данный масштаб дает информацию о размерах отдельных зерен угля с характерным размером ~ 1 мкм. Внутри таких зерен не может быть макропор и трещин, достаточно широких для фильтрации метана, что связано со склонностью углей к газодинамическим явлениям [20]. Цифровые изображения поверхности образцов показаны на рис. 2.

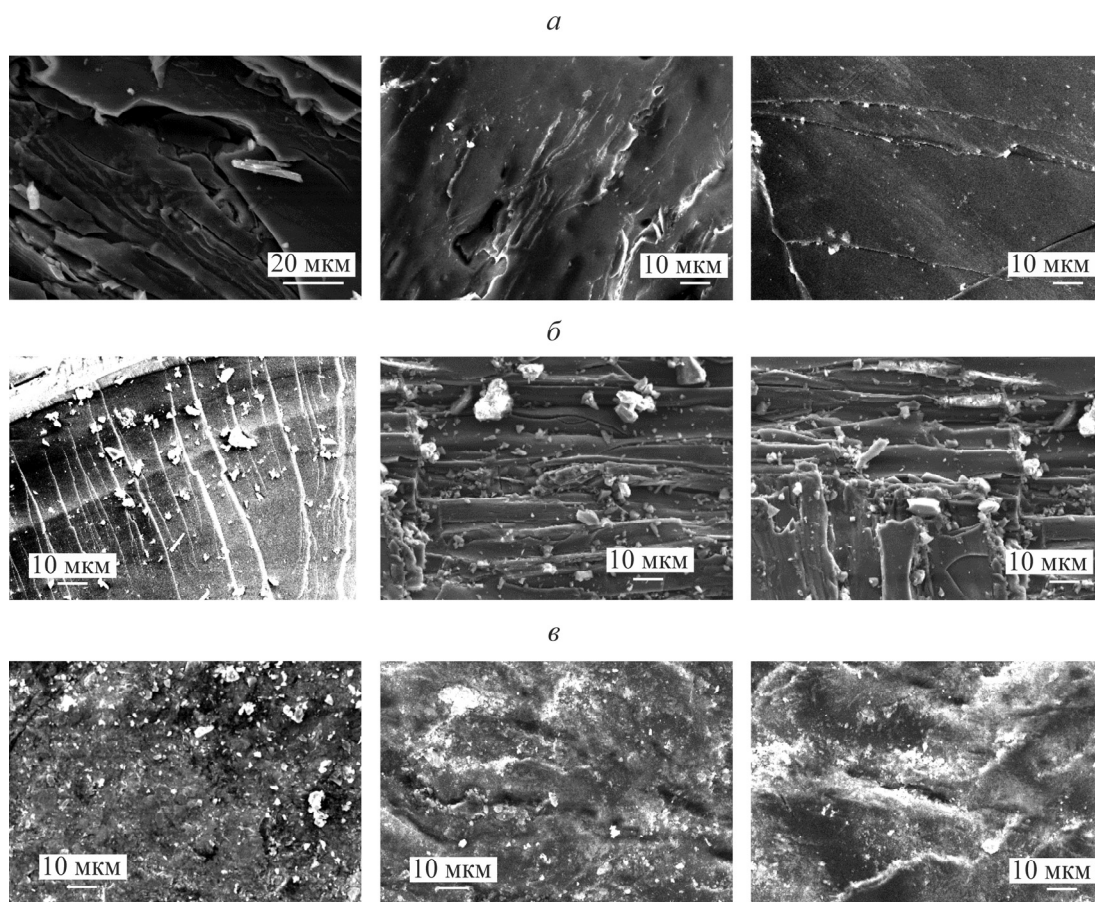


Рис. 2. Цифровые изображения поверхности образцов углей из неопасной области пласта (*a*), выбросоопасной зоны (*б*) и из выброшенного угля (*в*)

Структура углей, отобранных из разных областей пласта, на первый взгляд, хаотична, хотя поверхности углей из выбросоопасной зоны и выброса иногда отличаются от углей неопасной зоны более рыхлой структурой. Для количественного описания таких особенностей исследуемых объектов, как неоднородность их структуры, пространственная упорядоченность, периодичность, внутренняя организованность, проведены расчеты пространственной ориентации элементов по описанной методике и построены зависимости в системе координат “энтропия – сложность”. Разброс полученных значений по всей поверхности одного цифрового изображения достаточно велик и составляет для энтропии 0.3–0.9, для сложности — 0.20–0.35. Для дальнейшего анализа рассчитывается среднее значение “энтропия – сложность” для каждого изображения, показанное черной точкой на рис. 3а. Определив средние значения для одного цифрового изображения, можно построить зависимости этих значений для любых выбранных серий. На рис. 3б приведена оценка степени упорядоченности пространственной ориентации элементов в системе координат “энтропия – сложность” по цифровому изображению поверхности всех исследуемых образцов угля.

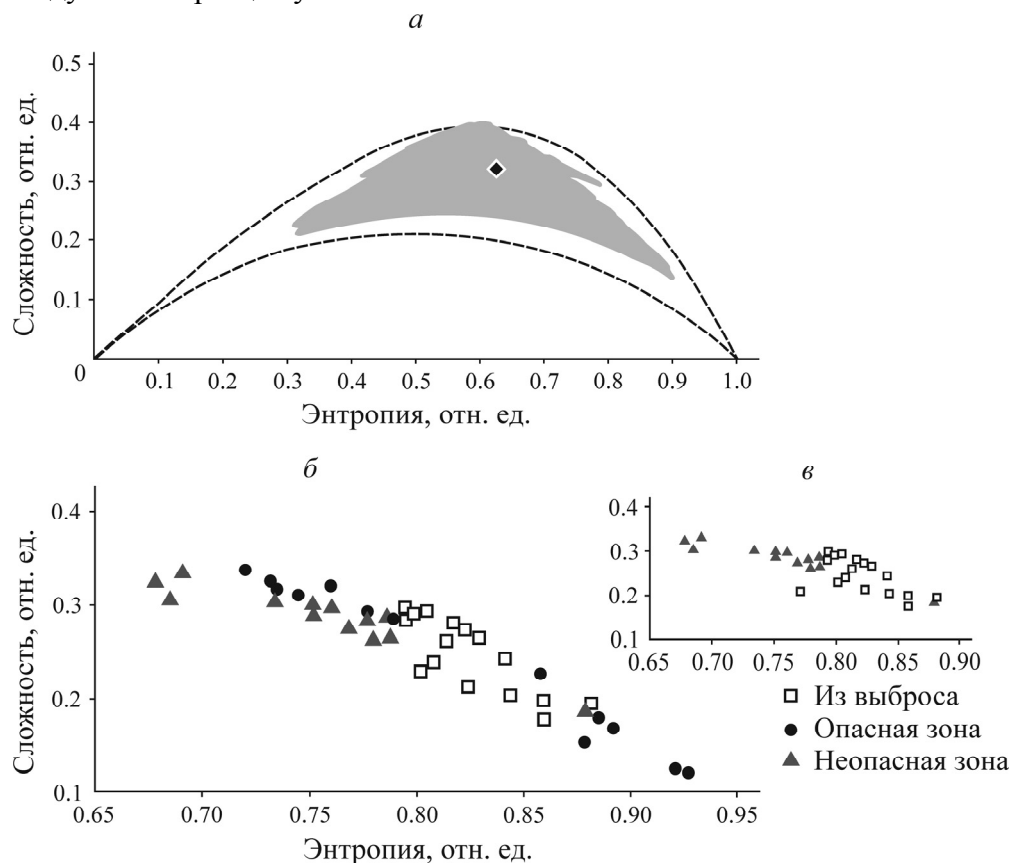


Рис. 3. Оценка степени упорядоченности пространственной ориентации элементов в системе координат “энтропия – сложность” по одной микрофотографии (а) и по среднему значению для каждого цифрового изображения поверхности углей из выброса из опасной и неопасной зон пласта (б); для сравнения — из выброса и неопасной зоны (в)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость “энтропия – сложность” отражает структуру образцов углей из разных областей выбросоопасного пласта. Видно, что разброс значений энтропии для образцов из неопасной области находится в пределах 0.67–0.78, сложности — 0.27–0.33, т. е. структура угля неопасной

области угольного пласта более упорядоченная. Для образцов из выбросоопасной зоны значения “энтропия – сложность” разделились на две группы точек (рис. 3б). Первая имеет значения “энтропия – сложность”, аналогичные значениям для структуры образцов из неопасной области, вторая — минимальные значения сложности 0.1 – 0.2 и максимальные энтропии 0.86 – 0.94, т. е. степень упорядоченности этих структурных элементов очень близка к полному хаосу. Большой разброс свойств упорядоченности элементов структуры в выбросоопасной зоне пласта (сочетание высокоупорядоченных элементов с наиболее хаотичными структурами) приводит к тому, что в таких зонах создаются условия для повышения вероятности развязывания газодинамических явлений. В [29] показано, что выбросоопасная зона пласта характеризуется повышенным значением летучих веществ в угле. Это подтверждает сделанный вывод о том, что присутствующие минеральные включения увеличивают неоднородность структуры и усиливают образование метана при метаморфизме угля, что и приводит к формированию потенциально выбросоопасной зоны пласта [30].

В выброшенном угле хаотично ориентированные элементы, присутствующие в выбросоопасной зоне, практически исчезают. Значения энтропии составляют 0.79 – 0.88, сложности — 0.19 – 0.30. В процессе выброса наибольшему разрушению подвержена та часть угля, элементы которой имеют большое значение энтропии 0.86 – 0.94 и наиболее хаотичную организацию структуры. Уголь с исходно хаотичной структурой в процессе выброса подвержен наибольшему разрушению с образованием “бешеной муки” и отрывом большого количества метильных групп –CH₃, что приводит к образованию метана [29, 30]. Оставшаяся часть угля из выброса в виде неразрушенных кусочков показывает несколько упорядоченную структуру с энтропией 0.78 – 0.86, но более хаотичную, чем неопасная область угольного пласта со значениями энтропии 0.33 – 0.78 (рис. 3в).

ВЫВОДЫ

Оценка степени упорядоченности пространственной ориентации элементов в системе “энтропия – сложность”, проведенная по цифровым изображениям поверхности углей, показала, что выбросоопасная зона пласта характеризуется сочетанием областей упорядоченных и хаотично расположенных элементов. В угле из пород внезапного выброса областей с наиболее высокими значениями энтропии не обнаружено. Это вместе с тем фактом, что в выбросоопасных зонах содержание летучих веществ повышено, а в выброшенном угле снижается до значений, характерных для неопасной зоны, свидетельствует в пользу гипотезы об ускоренном метаморфизме угля при выбросе. В процессе выброса в первую очередь разрушаются наиболее структурно неорганизованные области, их наличие в угле создает условия для повышения вероятности газодинамических явлений. Интенсивное разрушение структуры угля во время выброса происходит с разрывом наиболее слабых межатомных связей и сопровождается отрывом большого количества метильных групп –CH₃, что приводит к образованию и выделению метана, многократно превышающего природную газоносность пласта.

Используя цифровые фотографии образцов углей и предложенный метод построения диаграмм “энтропия – сложность”, можно определить невыбросоопасные зоны по структурным параметрам угля, уточнить тип произошедшего газодинамического явления при аварии в угольной шахте, т. е. установить, правомерно ли считать явление внезапным выбросом или обрушением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Скочинский А. А.** Современное состояние изученности проблемы внезапных выбросов угля и газа в шахтах // Научные исследования в области борьбы с внезапными выбросами угля и газа. — М.: Углетехиздат, 1958. — С. 5–15.
2. **Ходот В. В.** Внезапные выбросы угля и газа. — М.: Госгортехиздат, 1961. — 363 с.
3. **Гагарин С. Г., Еремин И. В., Лисуренко А. В.** Структурно-химические аспекты нарушенности каменных углей выбросоопасных пластов // ХТТ. — 1997. — № 3. — С. 3–14.
4. **Иванов Б. М., Фейт Г. Н., Яновская М. Ф.** Механические и физико-химические свойства углей выбросоопасных пластов. — М.: Наука, 1979. — 195 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. **Lama R. D. and Bodziony J.** Management of outburst in underground coal mines, J. Coal Geol., 1998, Vol. 35. — P. 83–115.
8. **Sao Y., He D., and Glick D. C.** Coal and gas outbursts in footwalls of reverse faults, J. Coal Geol., 2001, Vol. 48. — P. 47–63.
9. **Опарин В. Н., Киряева Т. А., Гаврилов В. Ю., Шутилов Р. А., Ковчавцев А. П., Танайно А. С., Ефимов В. П., Астраханцев И. Е., Гренев И. В.** О некоторых особенностях взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в угольных пластах Кузбасса // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 3–30.
10. **Han Y., Wang J., Dong Y., Hou Q., and Pan J.** The role of structure defects in the deformation of anthracite and their influence on the macromolecular structure, Fuel, 2017, Vol. 206. — P. 1–9.
11. **Чанышев А. И., Белоусова О. Е.** Об одном способе описания блочно-иерархической структуры массива горных пород с позиции учета неоднородности механических свойств // ФТПРПИ. — 2017. — № 3. — С. 29–36.
12. **Tang Z., Yang S., Zhai C., and Xu Q.** Coal pores and fracture development during CBM drainage: Their promoting effects on the propensity for coal and gas outbursts, J. Natural Gas Sci. and Eng., 2018, Vol. 51. — P. 9–17.
13. **Ройтер М., Крах М., Кислинг У., Векслер Ю.** О геомеханическом состоянии очистного забоя при отработке угольных пластов на шахте “Полысаевская” в Кузбассе // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 47–52.
14. **Beamish B. B. and Crosdale P. J.** Instantaneous outbursts in underground coal mines: an overview and association with coal type, J. Coal Geol., 1998, Vol. 35, No. 1–4. — P. 27–55.
15. **Хренкова Т. М., Голденко Н. Л.** Исследование продуктов механодеструкции газового угля, применяемого в процессе гидрогенизации // ХТТ. — 1978. — № 5. — С. 43–45.
16. **Хренкова Т. М., Кирда В. С.** Механическая активация углей // ХТТ. — 1994. — № 6. — С. 36–42.
17. **Фролков Г. Д., Фролков А. Г.** Механохимическая концепция выбросоопасности угольных пластов // Уголь. — 2005. — № 2. — С. 18–22.
18. **Фролков Г. Д., Липчанский А. Ф., Фролков А. Г.** О механохимической природе выделений угольного метана // Безопасность труда в пром-сти. — 2006. — № 7. — С. 50–53.
19. **Булат А. Ф., Минеев С. П., Прусова А. А.** Генерирование сорбированного метана, обусловленное релаксационным механизмом деформирования молекулярной структуры угля // ФТПРПИ. — 2016. — № 1. — С. 91–99.
20. **Малинникова О. Н., Учаев Дм. В., Учаев Д. В.** Мультифрактальная оценка склонности угольных пластов // ГИАБ. — 2009. — Отд. вып. № 12. — С. 214–233.

21. Трубецкой К. Н., Рубан А. Д., Викторов С. Д., Малинникова О. Н., Одинцев В. Н., Кочанов А. Н., Учаев Д. В. Фрактальная структура нарушенности каменных углей и их предрасположенность к газодинамическому разрушению // ДАН. — 2010. — Т. 431. — № 6. — С. 818–821.
22. Курако М. А., Симонов К. В., Кудря Н. О. Следы морских природных катастроф: численный анализ данных // Образовательные ресурсы и технологии. Спец. вып. — 2016. — № 2 (14). — С. 186–192.
23. Ribeiro H. V., Zunino L., Lenzi E. K., Santoro P. A., and Mendes R. S. Complexity-entropy causality plane as a complexity measure for two-dimensional patterns, PLoS ONE, 2012, Vol. 7, No. 8. — e40689.
24. López-Ruiz R., Mancini H. L., and Calbet X. A statistical measure of complexity, Phys. Let. A, 1995, Vol. 209. — P. 321–326.
25. Bandt C. and Pompe B. Permutation entropy: a natural complexity measure for time series, Phys. Rev. Let., 2002, Vol. 88, No. 17. — P. 174102.
26. Brazhe A. Shearlet-based measures of entropy and complexity for two-dimensional patterns, Phys. Rev. E 97, 2018. — P. 061301(7).
27. Lamberti P. W., Martin M. T., Plastino A., and Rosso O. A. Intensive entropic non-triviality measure, Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2004, Vol. 334, No. 1–2. — P. 119–131.
28. Zunino L. and Ribeiro H. V. Discriminating image textures with the multiscale two-dimensional complexity-entropy causality plane, Chaos, Solitons and Fractals, 2016, Vol. 91. — P. 679–688.
29. Малинникова О. Н., Ульянова Е. В., Долгова М. О., Зверев И. В. Изменение микроструктуры ископаемых углей в результате внезапных выбросов угля и газа // Горн. журн. — 2017. — № 11. — С. 27–32.
30. Алексеев А. Д., Ульянова Е. В., Васильковский В. А., Разумов О. Н., Зимина С. В., Скоблик А. П. Особенности структуры угля выбросоопасных зон // ГИАБ. — 2010. — № 8. — С. 164–179.

Поступила в редакцию 23/VII 2019

После доработки 17/IX 2019

Принята к публикации 23/IX 2019