

УДК 622.512

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОРЫВА ВОДЫ
В ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩЕМ УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ НАД ОГРАНИЧЕННЫМ ВОДОНОСНЫМ ГОРИЗОНТОМ**

Х. Т. Юй, Ш. Ю. Чжу, Я. Чэнь

*Институт технологий предотвращения и контроля опасности шахтных вод,
Китайский университет горного дела и технологий,
E-mail: yht0012@163.com, shyzhuqiao@163.com, 221116, г. Хучжоу, провинция Цзянсу, Китай*

Для оценки риска прорыва воды в почву глубокозалегающего угольного горизонта, находящегося в процессе разработки и расположенного над ограниченным водоносным бассейном, район исследования был разделен на структуры по методу фрактальной размерности. Рассчитан коэффициент прорыва воды. Выполнено разбиение региона изолиниями по закону распределения этого коэффициента. Обнаружено, что на исследуемой территории структурно расчлененная область и опасная зона прорыва воды хорошо согласуются, увеличивая достоверность оценки риска прорыва воды. Результаты исследований имеют важное практическое значение для обеспечения безопасной и эффективной разработки второго пласта угольного горизонта.

Глубокозалегающий уголь, структурная сложность, фрактальная размерность, коэффициент прорыва воды, численное разделение

DOI: 10.15372/FTPRPI20190309

Характеристики распределения сети разломов в угольных шахтах тесно связаны с проблемами безопасной добычи, такими как прорыв рудничной воды, выброс газа, поддержание кровли и почвы выработки [1 – 3]. При глубоком расширении шахты существует угроза прорыва воды из почвы выработки [4, 5]. Безопасность разработки над ограниченным водоносным горизонтом зависит от литологического состава и структурного состояния пород в подошве. Максимальное влияние оказывает структура разлома. Согласно статистическим данным, причиной большинства крупных наводнений в угольных шахтах в стране и за рубежом являются разломы [6]. В настоящее время коэффициент прорыва воды используется в качестве количественного показателя для оценки риска прорыва воды в рабочий горизонт шахты [7, 8]. Однако существует сравнительно немного новых исследований, посвященных сочетанию структурной сложности и коэффициента прорыва воды. Основываясь на глубине рабочего горизонта добываемого угля, находящегося выше ограниченного водоносного пласта, в Юнсянском угольном бассейне провинции Хэнань, в настоящей статье сравнивается количественная оценка индекса структурной сложности с коэффициентом прорыва воды, рассчитанным при добыче угля. Предварительная оценка риска прорыва воды необходима для предотвращения шахтного наводнения.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Исследуемая область расположена в уезде Юнчэн провинции Хэнань (рис. 1а). С улучшением производственных мощностей шахты уровень добычи постепенно переходит с горизонта –495 м на горизонт –800 м. В качестве способов развития юга и востока на –800 м применяется путевой уклон, конвейерный и наклонный ходок. У квершлага на горизонте –495 м есть слепой наклонный шахтный ствол, пробуренный до горизонта –800 м. В верхних и нижних частях скрытого наклонного шахтного ствола находится околоствольная выработка. Максимальная глубина основного разрабатываемого пласта составляет 1000 м. Каменноугольно-пермская система месторождения представляет угленосную залежь, а угольный пласт промышленного значения распределен в формациях Шаньси и Сяшихэцзы. Второй угольный пласт расположен в центральной части формации Шаньси, одной из основных угленосных толщ в этом районе.

Основная структура района имеет направление ССВ-СВ. Район состоит из серии скрытых антиклиналей, синклиналей и разломов от 10 до 30° на северо-востоке, за которыми следуют ВЗ структуры. Структура этой группы распространена на западе от скрытой антиклинали Юнчэн с более выраженными разломами, тогда как складчатая структура относительно менее развита. Характер распространения угленосных пластов строго подчиняется двум группам пластов. На локальном участке направление структур ориентировано на СЗ, где доминируют разломы и редки складчатые структуры. Среди них разлом F20, являющийся границей южной части месторождения. Его отклонение близко к востоку-западу, отклоняясь к северу, а угол наклона 60–70°. Это проявление естественно для разломов северной плиты, их амплитуда отклонения не превышает 400 м. Прорыв воды в разлом оказывает большое влияние на добычу угля на юге второго горизонта. К югу от второго горизонта в выработке выявлено 319 небольших разломов, большинство из которых — сформированные четко выраженные разломы. Плотность их составляет 7.9 ед./км². Из этих небольших разломов второго горизонта на юге преобладают СВ, ССВ, СВВ, СЗ, ССЗ и СЗЗ направления, с несколькими направлениями близкими к СЮ, которые представляют собой разломы под большим углом (рис. 1б).

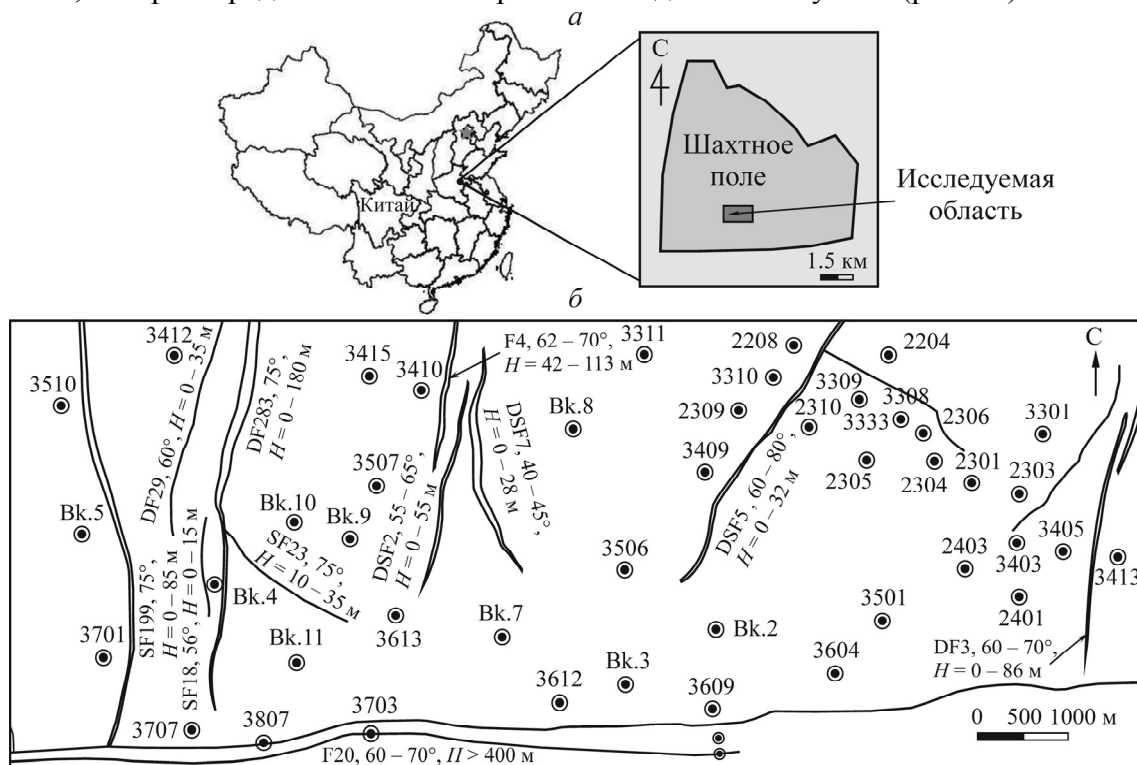


Рис. 1. Схема расположения угольной шахты (а) и основных разломов в исследуемом районе (б)

АНАЛИЗ СТРУКТУРНОЙ СЛОЖНОСТИ

Фрактальная теория широко использовалась в разных отраслях промышленности с момента ее возникновения и стала важным методом исследования [9–11]. Преимущество этой теории для оценки сложности структуры разлома становится все более очевидным, особенно в изучении геологических задач. Она охватывает не только количество разломов, групп и протяженность уровня простирания, но также неравномерность и распределение разломов [12–17]. В последние несколько лет, стремясь к оценке структурной сложности, многие научные школы развили фрактальную теорию многочисленными методами. Ся и др. ввели информационную размерность в структуру разлома шахты в угольном бассейне Хочжоу и обнаружили, что информация о фрактальной размерности может характеризовать относительную сложность разломной структуры шахты [18]. Лю применил фрактальную теорию для оценки сложности структуры разлома на месторождении Холинхэ и обсудил очевидное превосходство величины фрактальной размерности как показателя оценки сложности структуры [19]. Размер фрактала связан с плотностью разлома, длиной и равномерностью пространственного распределения. В соответствии с размером подобия сети трещин, может быть оценена структурная сложность различных сегментов блока, и эффект является более идеальным, чем другие показатели [19]. Хэ и др. использовали фрактальную геометрию для анализа взаимосвязи между характеристиками распределения геологической структуры и значимой опасностью горных районов на нескольких угольных месторождениях по всей стране, а также оптимизировали индексы измерения структурного прогнозирования [20]. Отмечено, что распределение нарушенного слоя и складчатая структура угольных месторождений во всех видах района разработок подчиняются фрактальному закону, а влияние распределения геологической структуры угольного месторождения на значимую опасность также можно описать фрактальной размерностью.

Размерность подобия D_s широко применяется во фрактальной теории. Для исследуемого объекта с самоподобием, если его разделить на N частей, то каждая часть будет подобна целому. По коэффициенту подобия r находится $D_s(F) = -\log N(r) / \log r$. Для определения фрактальной размерности сети разломов используется метод сеточного покрытия. Основные этапы заключаются в том, чтобы покрыть карту прямыми линиями с длиной стороны квадрата r , подсчитать число узловых точек $N(r)$, содержащих линии разлома, и затем получить соответствующий $N(r_i)$ в соответствии с определенным соотношением (обычно $1/2$), приведенным к r_i . Затем строится зависимость $\log N(r)$ от $\log r$, для которой D_s является тангенсом угла наклона прямой линии [21].

Структурная сложность основывается на данных о структуре разлома в плане изучаемого района и замыкается данными контурной линии разлома. Изображение линий структурной сетки можно прорисовать в программе “Автокад”. Для того чтобы вычислить размерность подобия фрактала, исследуемая область была разделена на 160 квадратных ячеек с длиной грани 500 м, не влияющей на результаты расчета. Коэффициент подобия вычислен по формуле $r_i = (1/2^n)r_0$.

Разрезанные квадратные ячейки впоследствии дробились на все меньшие квадраты, затем подсчитывалось количество линий сеток разломов для каждой меньшей квадратной ячейки. Для расчета фрактальной размерности использовался метод сеточного покрытия. На этом же принципе проводится оценка. Из анализа уравнения линейной регрессии, построенного по данным, представленным в логарифмическом масштабе (рис. 2), определен коэффициент корреляции для одного распределения из сети разломов, показывающий хорошее согласование с большей частью из них. Наклон линии тренда является размерностью подобия разлома.

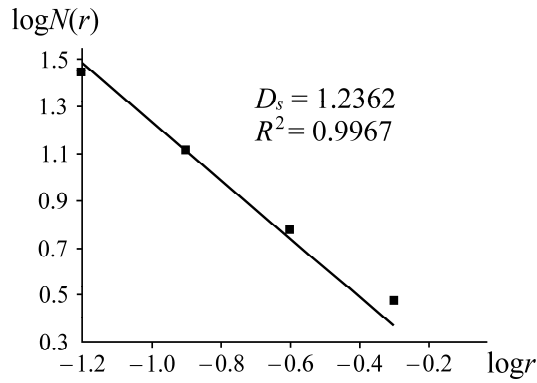


Рис. 2. Определение линейного уравнения регрессии и фрактальной размерности для квадратной ячейки

Для составления карты фрактальной размерности в программу Surfer введена расчетная размерность подобия (рис. 3). Поскольку оценка сложности структуры разлома по фрактальной размерности все еще находится на стадии доработки, единого стандарта ее оценки не существует [22, 23]. В соответствии с фрактальной размерностью и законом распределения разломов на изучаемой территории, разделим участки на сложные (фрактальная размерность > 1.2), средние ($1.2 - 0.7$) и простые (< 0.7).

Оценка фрактальной размерности структуры разлома выражена в форме изолинии, которая отражает сложность структуры разлома в изучаемом районе, и затем на изолинию нанесена количественная оценка (рис. 3). Чтобы классификация результатов была интуитивно понятной, контурная карта раскрашивается в разные цвета и создается подрисовочная легенда, где цветом обозначена сложность структуры разлома (рис. 4). Фактическое распределение разломов и фрактальная размерность эквивалентны, также распределение фрактальной размерности имеет определенную связь с направлением простирания разлома. На рис. 3 видно, что фрактальная размерность к востоку и западу от месторождения в основном выше 1.2. Согласно критерию классификации, она принадлежит к сложному участку. Из-за большого количества разломов и направления плотного ленточного распределения на локальных участках, расчетная карта фрактальной размерности также имеет область охвата с высокими значениями, т. е. регион, где хорошо сформированы разломы, и на них много пересекающихся разломов. Масштаб разломов достаточно большой, что свидетельствует о раздробленности горной массы в этом районе и о большом прорыве воды.

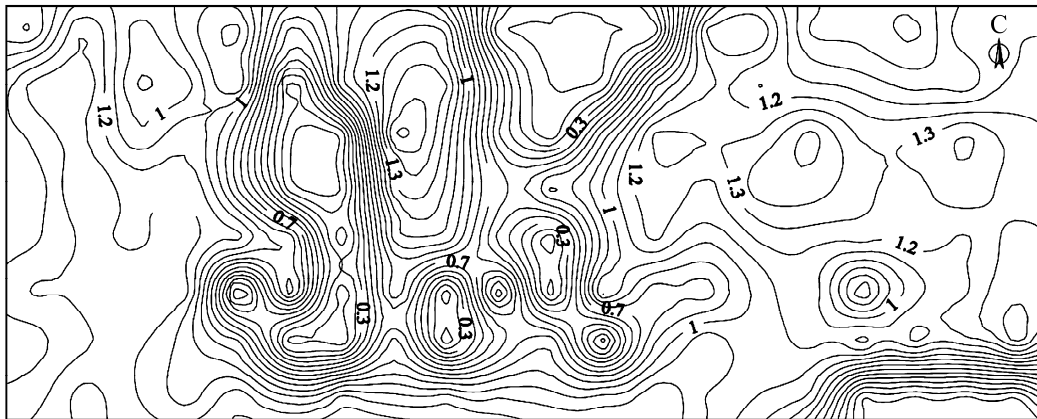


Рис. 3. Контурная карта фрактальной размерности разломов

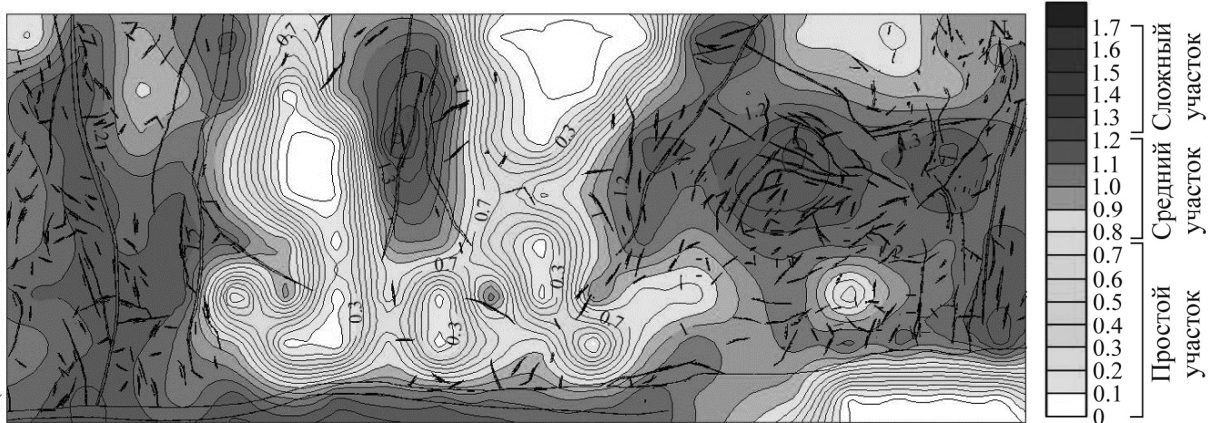


Рис. 4. Карта разделения структур по сложности с линиями разрыва

Фрактальная размерность центральной части исследуемого района меньше 0.7, с меньшим значением она формируется в центральной части структуры, которая принадлежит к простому участку. Фактическая структура разломов разреженная, разрывы встречаются редко. Масштаб разломов в общем невелик, и горный массив относительно не поврежден, что хорошо для безопасной добычи.

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА РИСКА ПРОРЫВА ВОДЫ В РАБОЧИЙ ГОРИЗОНТ ШАХТЫ

В настоящее время в Китае существует много методов оценки прорыва воды в рабочий горизонт угольного пласта, среди которых широко распространен метод расчета коэффициента прорыва воды. Для каждой соответствующей скважины он определяется как $T = P / M$ (P — давление в водоносном горизонте, МПа; M — мощность водоупора, м) [24]. Изолиния коэффициента прорыва воды строится в программе Surfer в соответствии с выбранной шириной и долготой скважины. Согласно [24], получена оценка риска прорыва воды на уровне глубокозалегающего угольного пласта. На рис. 5 изолиния коэффициента прорыва воды имеет тенденцию к понижению с востока и запада до центральной части изучаемого района; на востоке и западе он выше, т. е. риск прорыва воды значителен.

Благодаря использованию информации по нескольким подходам, возрастает надежность и точность предсказания в сравнении с одним методом. Данное исследование основано на многовариантной теории слияния информации для согласования двух способов оценки риска фрактальной размерности и метода расчета коэффициента прорыва воды с целью оценки риска водопритока в целом [25]. Специфика принципов оценки показана в таблице.

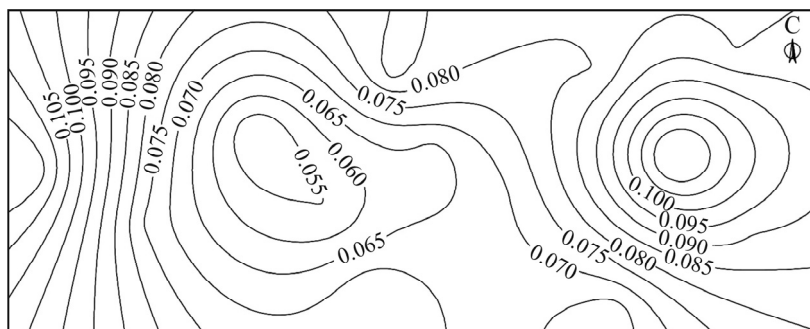


Рис. 5. Контурная карта коэффициента прорыва воды: безопасный участок $T < 0.06$; участок с небольшим риском $0.1 \geq T$; опасный участок $T > 0.1$

Комплексная оценка фрактальной размерности и коэффициент прорыва воды

Фрактальная размерность	Коэффициент прорыва воды	Риск прорыва воды
< 0.70	< 0.06	Безопасно
< 0.70	0.06 – 0.10	Средняя опасность
< 0.70	> 0.10	Опасно
0.70 – 1.20	< 0.06	Средняя опасность
0.70 – 1.20	0.06 – 0.10	Средняя опасность
0.70 – 1.20	> 0.10	Опасно
> 1.20	< 0.06	Средняя опасность
> 1.20	0.06 – 0.10	Средняя опасность
> 1.20	> 0.10	Опасно

Между контурами фрактальной размерности структурной сложности и хроматограммой коэффициента прорыва воды в частях исследуемого участка есть положительная корреляция. Теоретически нет прямой корреляции между двумя способами оценки. Однако, согласно неполной статистике, результаты для случаев прорыва шахтных вод на месторождениях Северного Китая показывают, что 74.6% прорыва воды в рабочий горизонт шахты связано со структурой разлома. Разлом часто является фактором прорыва воды в рабочий горизонт шахты, поскольку его структура в условиях постоянного давления приводит к уменьшению мощности эффективного водоносного горизонта вдоль поверхности разлома. Несмотря на то, что существует взаимосвязь между фрактальной размерностью и коэффициентом прорыва воды, она согласована не полностью.

На рис. 6 показано, что коэффициент прорыва воды небольшой в северной области, где структура сложная или фрактальная размерность низкая на участке, где коэффициент прорыва воды большой. Поскольку плотность распределения блоков фрактальной размерности преобладает над распределением сетки скважин, по которым велся расчет коэффициента прорыва воды, правила распределения контуров двумя методами в локальных участках различны. Основываясь на двух методах оценки риска, сделан вывод о том, что риск прорыва воды из почвы пласта уменьшается с востока и запада до центральной части изучаемого района.

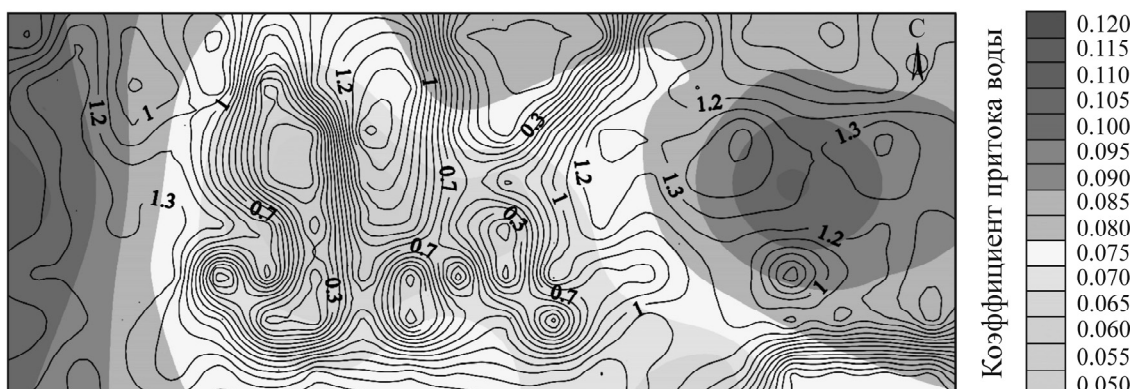


Рис. 6. Карта комплексной оценки риска прорыва воды

ВЫВОДЫ

Теория фракталов применяется для анализа сложности структур разломов глубокозалегающего пласта второго горизонта в изучаемом районе. Структура разломов на востоке и западе данного района наиболее сложная. Согласно анализу контурной карты оценки риска, коэффи-

циент прорыва воды в почву угольного пласта второго горизонта в восточном и западном районах больше среднего. При сравнении только с результатами фрактальной размерности, комплексный результат оценки прорыва воды, полученный по двум методам, имеет очевидную положительную корреляцию в большей части района исследования. На основе комплексной оценки сложности структуры разлома и коэффициента прорыва воды установлено, что риск прорыва воды в рабочий горизонт шахты в восточной и западной части исследуемого района шахты наиболее вероятен, что препятствует безопасному ведению горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sun Yajun, Xu Zhimin, Dong Qinghong, Liu Shengdong, Gao Rongbin, and Jiang Yuhai.** Forecasting water disaster for a coal mine under the xiaolangdi reservoir, *J. of China University of Min. and Tech.*, 2008, Vol. 18, No. 4. — P. 516–520.
2. **Nguyen Q. P., Nguyen V. M., Konietzky H., Nguyen Q. L., and Pham N. A.** Numerical simulation of the influence of water inrush on underground coal mining stability in Vietnam, *Mine Planning and Equipment Selection*, Springer International Publishing, 2014. — P. 629–636.
3. **Odintsev V. N. and Miletenko N. A.** Water inrush in mines as a consequence of spontaneous hydro fracture, *J. Min. Sci.*, 2015, Vol. 51, No. 3. — P. 423–434.
4. **Li Bo, Wu Qiang, Duan Xianqian, and Chen Mengyu.** Risk analysis model of water inrush through the seam floor based on set pair analysis, *Mine Water and the Environment*, 2018, Vol. 37, No. 2. — P. 281–287.
5. **Yao Duoxi, Ren Yinfa, Zhu Weifeng, et al.** Classification of rock mass structure types of 10 coal floor in suntuan mine based on fractal theory, *Mine Safety and Environment Protection*, 2007, Vol. 34, No. 2. — P. 26–28.
6. **Huang Cunhan, Feng Tao, Wang Weijun, et al.** Study on failure mechanism of water-repellent floor under the influence of fault, *J. of Min. and Safety Eng.*, 2010, Vol. 27, No. 2. — P. 219–227.
7. **Wang Jitang and Wang Xiulan.** Discussion on water inrush coefficient method applied to predict water inrush danger of seam floor based on gaojiata mine as example, *Coal Science and Technology*, 2011, Vol. 39, No. 7. — P. 106–111.
8. **Liu Dewang.** The study on the water inrush risk assessment of Ordovician limestone using water inrush coefficient method and its application in the huipodi coal mine, *China Coal*, 2016, Vol. 42, No. 5. — P. 118–120.
9. **Mandelbrot B. B.** The fractal geometry of nature, Birkhauser Verlag, 1982. — P. 468.
10. **Xu Zhibin, Xie Heping, and Wang Jiyao.** Divisional dimension — comprehensive index for evaluating the complexity of mine fracture, *J. of China University of Min. and Tech.*, 1996, Vol. 25, No. 3. — P. 11–15.
11. **Barton C. C. and Larsen E.** Fractal geometry of two dimensional fracture networks at yucca mountain, southwest Nevada, *proc. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports*, 1985. — P. 77–84.
12. **Gao Rongbin, Yan Ming, Zhang Dongying, et al.** Research on evaluation method to structural complexity and its application, *China Coal*, 2013, Vol. 39, No. 6. — P. 28–30.
13. **Diao Shouzhong and Chao Hongtai.** Main topics of fractal research into earthquakes in China, a review, *Fractals and Dynamic Systems in Geoscience*, 1994. — P. 197–211.
14. **Zuo Renguang and Emmanuel John M. Carranza.** A fractal measure of spatial association between landslides and conditioning factors, *J. of Earth Science*, 2017, Vol. 28, No. 4. — P. 588–594.
15. **Li Renzheng, Wang Qi, Wang Xinyi, Liu Xiaoman, Li Jianlin, and Zhang Yanxin.** Relationship analysis of the degree of fault complexity and the water irruption rate based on fractal theory, *Mine Water and the Environment*, 2015, Vol. 36, No. 1. — P. 18–23.

16. **Shi Longqing, Li Changsong, Gao Weifu, et al.** Characteristics of Fracture Structure in Suncun Mine Field and Analysis of Influence on Water Inrush, *Coal Technology*, 2015, Vol. 34, No. 9. — P. 111–113.
17. **Hou Haihai, Shao Longyi, Li Yonglong, Li Zhen, Zhang Wenlong, and Wen Huaijun.** The pore structure and fractal characteristics of shales with low thermal maturity from the Yuqia coalfield, northern Qaidam basin, northwestern China, *Frontiers of Earth Science*, 2018, Vol. 12, No. 1. — P. 148–159.
18. **Xia Yucheng, Fan Huairan, Hu Mingxing, et al.** Fractal characteristics of fault structure in huozhou mining area, *J. of Xi'an Mining Institute*, 1997, Vol. 17, No. 1. — P. 23–25.
19. **Liu Yulin.** Application of fractal theory in structural complexity evaluation of huolinhe coalfield, *Coal Technology*, 2004, Vol. 23, No. 11. — P. 91–93.
20. **He Jun and Liu Mingju.** Simulation study on fractal characteristics of fault distribution, *Coalfield Geology and Exploration*, 2002, Vol. 30, No. 1. — P. 13–15.
21. **Zhang Xu, Zhu Yanming, Chen Shangbin, et al.** Applying fractal theory to evaluate the structural complexity of the five districts of Tangshan mine, *Safety in Coal Mines*, 2012, Vol. 43, No. 6. — P. 164–167.
22. **Guo Xinshan and Shi Longqing.** Quantitative analysis of fault water inrush risk based on fault influence factor and fault fractal dimension characteristics, *J. of Shandong University*, 2014, Vol. 44, No. 5. — P. 58–64.
23. **Wu Yudong, Ju Yiwen, Hou Quanlin, Pan Jienan, Zhang Y., and Fan J.-J.** Application of fault's information dimensions among different coal seams in the prediction of deep coal resources exploitation, *J. of China Coal Society*, 2010, Vol. 35, No. 8. — P. 1323–1330.
24. **State Administration of coal mine safety,** detailed rules for prevention and control of water in coal mines, Coal Industry Press, Beijing, 2018. — 64 p.
25. **Zhang Xinbin, Cheng Jiulong, Li Li, et al.** Multi-sources information fusion method and its applications in prediction of water inrush of Ordovician limestone aquifers in colliery, *Science of Surveying and Mapping*, 2006, Vol. 31, No. 6. — P. 146–148.

Поступила в редакцию 09/VII 2018

После доработки 07/VI 2019

Принята к публикации 28/V 2019