

УДК 622.142.5:551.243

**ГОРНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ
УГОЛЬНОГО ПЛАСТА В ВЫЕМОЧНОМ СТОЛБЕ**

С. В. Шаклеин¹, Т. Б. Рогова²

¹*Институт угля и углехимии СО РАН,*

E-mail: sv51950@mail.ru, просп. Ленинградский, 10, 650065, г. Кемерово, Россия

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

Представлен новый метод горно-геометрического прогнозирования местоположения и вертикальной амплитуды нарушений в границах выемочного столба, использующий данные о координатах пунктов маркшейдерской съемочной сети. Сеть маркшейдерских пунктов делится на систему ячеек — выпуклых четырехугольников, вершины которых являются пунктами маркшейдерских съемок. Для каждого четырехугольника оцениваются неопределенности геометризационной гипсометрии угольного пласта, которые рассматриваются как невязки и устраняются в процессе уравнивания сети маркшейдерских точек путем определения поправок к их высотам. Метод заключается в расчете и анализе поправок к измеренным абсолютным высотным отметкам точек пласта, расположенных в горных выработках, введение которых устраняет неопределенность интерпретации геологических данных. Поправки рассматриваются только в качестве показателя значимости погрешностей измерений и интерполяции, имеющихся в окрестностях конкретных точек измерений. Нарушение прогнозируется в случае, если наблюдается резкое изменение значений поправок между соседними точками измерений.

Дизъюнктивное нарушение, угольный пласт, прогноз, выемочный столб

DOI: 10.15372/FTPRPI20220403

Результаты прогнозирования тектонической нарушенности угольных пластов используются для детального планирования горных работ, и их достоверность непосредственно влияет на качество горных проектов. В настоящее время прогноз тектонического нарушения осуществляется в процессе геологического прогнозирования условий отработки выемочных столбов преимущественно на основе экспертного обобщения опыта горных работ и использования шахтных наблюдений и измерений. Однако степень достоверности такого прогнозирования снижается с увеличением протяженности очистных забоев [1]. Все более широкое распространение получают также геофизические методы исследования [2]. Вместе с тем существуют возможности использования в этих целях нетрадиционного геолого-геометрического подхода, не требующего проведения специальных дополнительных измерений и основанного на ранее предложенном методе уравнивания сети разведочных сетей [3].

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Метод прогноза нарушений угольного пласта основан на анализе характера изменения количественных характеристик степени неопределенности результатов геометризации положения поверхности кровли или почвы пласта в контуре подготовленного выемочного столба. Необходимые данные для прогноза — координаты X , Y , Z маркшейдерских (съемочных) пунктов, расположенных в вентиляционном и конвейерном штреках выемочного столба (рис. 1).

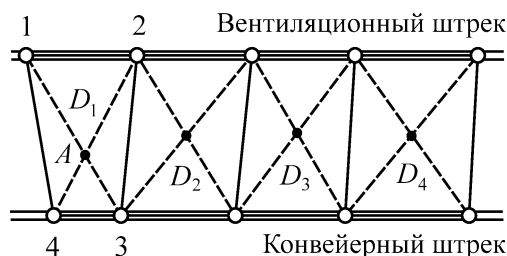


Рис. 1. Четырехугольные ячейки сети маркшейдерских пунктов

Пусть дана сеть маркшейдерских пунктов. Разобьем ее на систему ячеек — выпуклых четырехугольников, вершинами которых являются маркшейдерские пункты. Вершины каждого четырехугольника обозначим 1–4, начиная с произвольной вершины и увеличивая их по мере его обхода по направлению движения часовой стрелки. В каждом четырехугольнике проведем две диагонали. Для четырехугольника 1–2–3–4 — это диагонали 1–3 и 2–4, пересекающиеся в точке A . Значение абсолютной высотной отметки почвы или кровли пласта в балтийской системе высот в точке A (высотной отметки пласта) из каждой диагонали (Z_{1-3} и Z_{2-4}) может быть определено путем интерполяции. Теоретически $Z_{1-3} = Z_{2-4}$. Однако из-за наличия погрешностей измерений и интерполяции значения Z_{1-3} и Z_{2-4} не будут совпадать друг с другом. Их разность D , являясь разностью двух независимых косвенных определений, может рассматриваться в качестве численной меры неоднозначности геологических построений в контуре четырехугольника сети маркшейдерских точек. Дальнейшее описание метода предполагает использование линейной интерполяции высотных отметок пласта. Разработан вариант нелинейной интерполяции высотных отметок пласта (кубический сплайн), для применения которой необходимо знание элементов залегания пласта (угол падения и направление падения) в районе маркшейдерского пункта. Геологическая шахтная служба, несмотря на наличие соответствующих нормативных требований, данные измерения не проводит. В связи с этим использование сплайн-интерполяции высотных отметок пласта с практической точки зрения нереализуемо, хотя и желательно.

Неоднозначность интерпретации геологических данных характеризуется тремя разновидностями ошибок: ошибками определения координат X , Y , Z точек маркшейдерской съемки; ошибками интерполяции высотных отметок; дополнительными ошибками интерполяции, вызванными влиянием нарушений (уже обнаруженных или еще неизвестных). Три перечисленные ошибки проявляются совместно и обуславливают общую ошибку геометризации гипсометрии пласта. Для прогнозирования нарушений необходимо оценить влияние только последней из них. Процесс такой оценки может быть основан на предположении, что ошибки в значениях координат X , Y , Z (зависящие от методики измерения и от используемых технических средств) и ошибки интерполяции (зависящие от плотности сети маркшейдерских съемочных пунктов и от сложности геологического строения пласта) в отдельном выемочном столбе имеют характер “случайного шума”, действуют повсеместно и относительно постоянны.

Резкое изменение значений общей ошибки геометризации между парой соседних маркшейдерских пунктов является признаком наличия дополнительной ошибки интерполяции и может указывать на факт нарушения между ними. Определив положение нескольких направлений, пересекаемых нарушением, можно спрогнозировать местонахождения самого нарушения.

Для реализации изложенного подхода необходимо иметь оценку значимости общей погрешности геометризации гипсометрии пласта в районе расположения каждой маркшейдерской точки. Для этого можно использовать возникающие в четырехугольных ячейках сети маркшейдерских пунктов разности D , связанные с ошибками геометризации пласта. Если используется линейная интерполяция, то разность D вычисляется по формулам:

$$D = (Z_3 - Z_1)x + Z_1 - (Z_4 - Z_2)x' - Z_2,$$

$$x = \frac{L_1}{R_1}, \quad x' = \frac{L_2}{R_2},$$

где Z_i — отметки пласта в пунктах маркшейдерской сети; R_1, R_2 — длины диагоналей 1–3 и 2–4; L_1, L_2 — расстояния от точек 1 и 2 до точки пересечения диагоналей A (рис. 1).

Исходя из теоретического равенства разности D нулю, его значение можно рассматривать в качестве “невязки”, т. е. меры выполнения геометрического, объективно существующего условия. Имея значения невязок по всем четырехугольникам сети, можно поставить задачу уравнивания: найти величины (поправки), на которые следовало бы изменить измеренные значения показателя с тем, чтобы невязки по всем четырехугольникам разведочной сети одновременно стали бы равными нулю. Так как разности D обусловлены погрешностями измерений и интерполяции, то и полученные поправки объективно зависят от этих же факторов. Именно эта зависимость лежит в основе уравнивания как метода анализа.

Методика использования результатов уравнивания не предполагает корректировки результатов выполненных измерений. Поправки рассматриваются лишь в качестве меры значимости погрешностей измерений и интерполяции в окрестностях маркшейдерских точек.

Уравнивание сети маркшейдерских точек рекомендуется выполнять коррелятным методом, процедура которого описана в [3]. В результате уравнивания определяется поправка ε_i к координате Z каждой маркшейдерской точки. Характеристикой степени изменения поправок между парами соседних точек служит величина, условно называемая градиентом поправок:

$$\text{grad} \varepsilon_{ij} = \frac{|\varepsilon_i - \varepsilon_j|}{L_{ij}},$$

здесь $\varepsilon_i, \varepsilon_j$ — поправки для i -й и j -й соседних точек; L_{ij} — расстояние между i -й и j -й соседними точками.

Градиенты поправок вычисляются по направлениям диагоналей четырехугольников ячеек сети маркшейдерских точек, а также по их сторонам, расположенным внутри выемочного столба (для четырехугольника 1–2–3–4 (рис. 1) это будут направления 1–3, 2–4, 1–4 и 2–3).

Поскольку приращение поправок, связанных с ошибками определения координат пунктов маркшейдерских съемок и ошибками интерполяции, не может быть значительным, то значения формируемых ими градиентов поправок не должны претерпевать больших изменений. Распре-

деление таких градиентов (будем называть их “обычными”) теоретически должно иметь одно модальное значение и быть близко к нормальному закону распределения. Опыт показывает, что такие распределения наблюдаются в случае, если в пределах выемочного столба нарушения отсутствуют (рис. 2а).

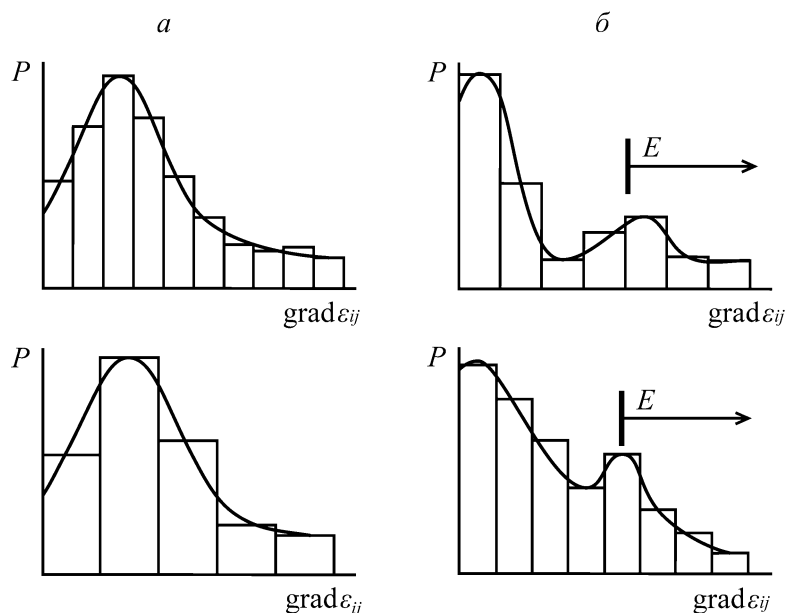


Рис. 2. Примеры распределений градиентов поправок $\text{grad} \varepsilon_{ij}$ к отметкам маркшейдерских пунктов P (фактические данные) для выемочных столбов без нарушений (а) и выемочных столбов, пораженных нарушениями (б)

Градиенты, связанные с наличием дизъюнктивных нарушений (в дальнейшем — “экстремальные” градиенты), должны образовывать собственные законы распределения, отличающиеся своим математическим ожиданием и дисперсией. В результате возникновения дополнительной ошибки интерполяции, вызванной влиянием нарушения, поправки увеличивают свои абсолютные значения, что приводит к тому, что математическое ожидание в распределении экстремальных градиентов будет выше, чем в распределении обычных градиентов.

Отсюда следует, что распределение градиентов поправок в выемочном столбе с нарушениями должно быть суперпозицией нескольких законов распределения, т. е. являться мультимодальным. Это многократно подтверждено на практике (рис. 2б). Используя гистограмму распределения градиентов поправок, можно определить экстремальное значение градиента поправок E , при превышении которого градиенты будут экстремальными. Направление между маркшейдерскими пунктами, градиент поправок между которыми является экстремальным, рассматривается как направление, вероятно пересеченное нарушением.

Направления экстремальных градиентов показаны на плане горных выработок (рис. 3). Затем отображается прогнозируемое положение линии нарушения таким образом, чтобы ее пересекали линии экстремальных градиентов. Ориентировка этой линии принимается такой же, как ориентировка линий нарушений уже известной системы нарушений. Если система нарушений отсутствует или их существует две и более, то линия прогнозируемого нарушения проводится параллельно специально построенным изолиниям поправок.

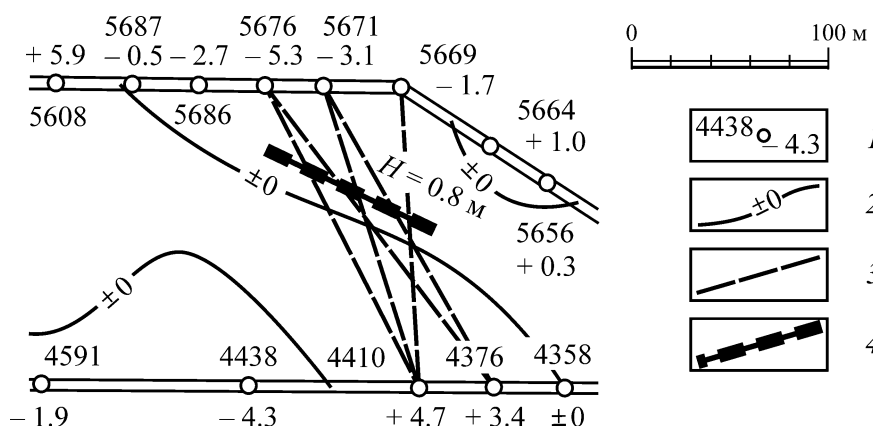


Рис. 3. Прогнозирование положения нарушения по результатам уравнивания сети маркшейдерских пунктов: 1 — маркшейдерский пункт, его номер и поправка к отметке; 2 — изолиния поправок ± 0 м; 3 — линия экстремального градиента поправок; 4 — прогнозируемая линия нарушения

Наблюдаемая на опыте параллельность линий нарушений и изолиний поправок объясняется следующим образом. Наибольшие (экстремальные) значения градиентов поправок, характеризующие скорость изменения поправок, могут быть только в направлении, близком к направлению линий наибольшего ската топографической поверхности поправок. Поскольку линия нарушения пересекает линии наибольшего наклона поверхности поправок, его ориентировка должна быть близка к перпендикуляру к ним, т. е. линия нарушения будет параллельна изолиниям поправок.

В результате статистической обработки экспериментальных материалов для нарушений с вертикальными амплитудами от 1 до 19 м разработана методика прогноза вертикальных амплитуд нарушений. На первой стадии прогнозирования вертикальной амплитуды нарушения работа ведется по отдельным четырехугольным ячейкам сети маркшейдерских точек. Если прогнозируемая линия нарушения пересекает одну диагональ четырехугольника (рис. 4а), находится точка B пересечения диагонали и линия нарушения. Определяется ближайшая к B вершина четырехугольника (номер 2 на рис. 4а) и измеряется расстояние между ними r . Ожидаемая вертикальная амплитуда разрыва рассчитывается по формуле

$$H = |D| (1.5 - 3.4d + 2.2d^2),$$

где d — отношение r к длине диагонали R (рис. 4а).

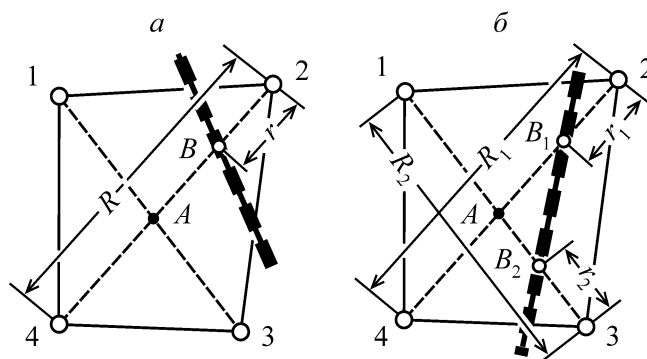


Рис. 4. Прогнозирование вертикальной амплитуды нарушения

Если прогнозируемая линия нарушения пересекает две диагонали четырехугольника (рис. 4б), то находятся две точки пересечения диагоналей и линии нарушения — точки B_1 и B_2 . Ожидаемая вертикальная амплитуда разрыва определяется как

$$H = \frac{2.0|D|}{1 + 0.8|D|} [1.94(d_1 + d_2) + 0.3],$$

где r_1, r_2 — расстояния от нарушения до ближайших вершин четырехугольника (рис. 4б); d_1, d_2 — отношение длин r_1 и r_2 к длинам диагоналей R_1 и R_2 .

Итоговое значение прогнозируемой вертикальной амплитуды нарушения рассчитывается как среднеарифметическое значение амплитуд, прогнозируемых по всем пересекаемым им четырехугольным ячейкам сети маркшейдерских пунктов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Практическое применение предложенного метода прогнозирования нарушений указывает на высокую подтверждаемость прогнозов (60–80 %). Установлено, что при прогнозировании необходимо выполнять несколько условий.

1. Форма четырехугольника должна отвечать следующим требованиям:

- вычисляемые параметры x и x' должны иметь значение 0.2–0.8;
- внутренние углы четырехугольника находятся в пределах 25–155°;
- отношение длины длинной диагонали к длине короткой не должно превышать 2.6;
- отношение суммы длин двух наиболее длинных противоположных сторон четырехугольника (сторон 1–4 и 2–3 на рис. 1) к сумме длин наиболее коротких противоположных сторон четырехугольника (сторон 1–2 и 3–4) должно быть менее 4.

2. Влияние нарушения на разность D зависит от взаимного расположения линии нарушения и диагоналей четырехугольника сети маркшейдерских точек. Для усиления этого влияния разделение сети точек на четырехугольники должно выполняться с перекрытием четырехугольников друг другом. На первом этапе работы формируются четырехугольники со сторонами примерно ортогональными горным выработкам (рис. 5а). Затем на них накладываются четырехугольники со сторонами, получаемыми в результате сдвига их вершин в разных направлениях (рис. 5б, в). Три группы четырехугольников (рис. 5а–в) объединяются в единую совокупность, являющуюся итоговым результатом формирования четырехугольников (рис. 5г). Запрещается выделение четырехугольников, не имеющих общих сторон ни с одним другим четырехугольником.

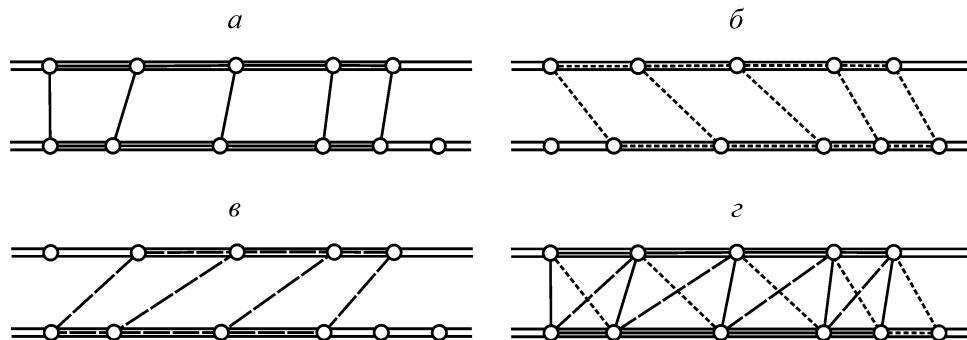


Рис. 5. Разбиение сети маркшейдерских пунктов на четырехугольные ячейки

3. Плохая обусловленность возникающей при уравнивании системы уравнений коррелят (на практике может включать в себя до 300 уравнений) не позволяет качественно решить ее с помощью метода Гаусса, широко используемого в геодезии. Для ее решения применяется итерационный метод А. Н. Трушникова [4].

4. Определение экстремального градиента поправок выполняется на основе анализа гистограммы градиентов поправок. Вид гистограммы существенно зависит от принятого числа ее интервалов. Известные методы определения числа интервалов [5 – 7] неэффективны вследствие того, что распределение градиентов поправок является мультимодальным и усеченным распределением, а также из-за необходимости детального изучения “хвоста” распределения. Предложен специальный метод определения оптимального количества интервалов гистограммы.

Известно, что количество интервалов гистограммы не должно быть слишком большим (шум заглушает сигнал и распределение ненадежно). Однако при небольшом количестве интервалов особенности распределения сглаживаются и теряются. Следовательно, количество интервалов гистограммы должно обеспечивать оптимальный баланс между уровнем случайных флуктуаций частот и степенью детализации описания распределения. Если случайные изменения частот будут сглажены в результате использования оптимальной ширины интервала, то частоты соседних интервалов меняются плавно и относительно незначительно. Если гистограмма подробно и достоверно описывает особенности распределения, частоты также должны меняться плавно и незначительно.

В обоих случаях оптимальным количеством интервалов будет то, что соответствует минимальному колебанию частот в соседних интервалах гистограммы. Колебания частот можно количественно оценить с помощью показателя, характеризующего среднеквадратичное значение отношения разности частот в соседних интервалах гистограммы к их среднему значению:

$$\eta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k-1} (P_i - P_{i+1})^2}{\sum_{i=1}^{k-1} (P_i + P_{i+1})^2} \cdot \frac{1}{k-1}},$$

где k — число интервалов; P_i — частота в i -м интервале.

Выбор оптимального количества интервалов гистограммы градиентов поправок заключается в построении нескольких вариантов гистограммы с разным количеством интервалов, вычислении показателя η для каждого из них и принятии в качестве конечного количество интервалов, при котором η минимально (9 интервалов на рис. 6). Учитывая точку зрения, изложенную в [5], в расчетах следует использовать только часть данных, ограниченную значением квартиля, соответствующего 80 % общего количества градиентов. Количество интервалов, с которых следует начинать построение различных вариантов гистограмм, должно включать количество интервалов, рассчитываемых по формуле Стерджеса:

$$k = 1 + \log_2 N,$$

N — число градиентов поправок [7].

После построения оптимального варианта гистограммы осуществляется ее анализ на предмет установления экстремального значения градиента. Изложенный метод прогнозирования нарушений реализован в виде специальной прикладной программы.

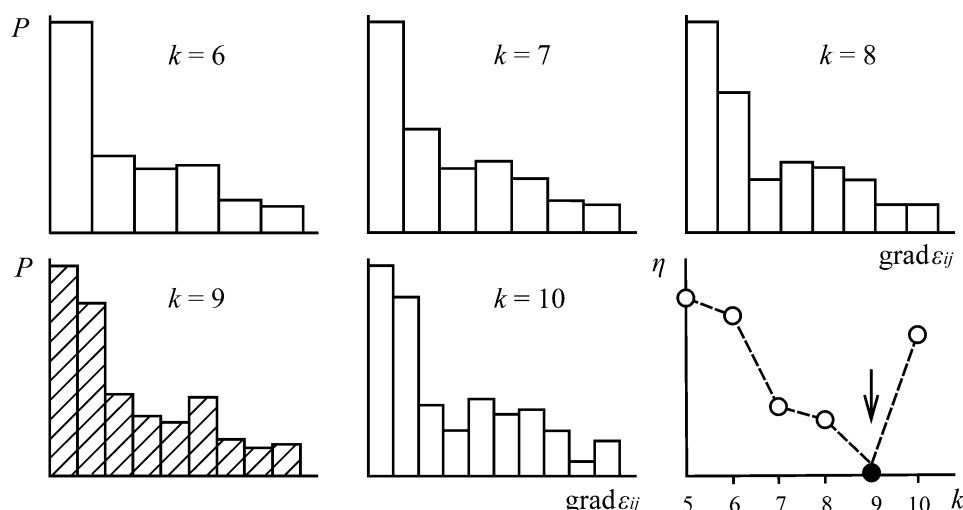


Рис. 6. Определение оптимального числа интервалов гистограммы градиентов поправок

ВЫВОДЫ

Предлагаемый метод геолого-геометрического прогноза местоположения и амплитуд тектонических нарушений имеет достаточно высокую достоверность. Он успешно опробован в условиях угольных месторождений Кузбасса и применяется при оценке горно-геологических условий разработки угольных пластов, выявлении аномальных тектонических зон и других участков изменения геомеханических характеристик вмещающих пород, осуществляемой при подготовке 40 выемочных столбов угольных шахт к вводу в эксплуатацию по действующим требованиям. Метод не требует проведения специальных измерений, так как использует данные, получаемые в процессе выполнения стандартных маркшейдерских работ. Характер используемых данных позволяет многократно выполнять прогнозирование в процессе проведения горных выработок, а также своевременно фиксировать и учитывать наличие ранее неизвестной нарушенности при планировании горных работ. Применение метода не исключает использование геофизических методов исследования выемочных столбов, а их совместное применение способно повысить объективность получаемых результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черепанов В. Г., Шаклеин С. В. Оценка полноты изучения дизъюнктивной нарушенности угольных пластов в контуре подготовленных выемочных столбов очистных забоев большой протяженности // Недропользование XXI век. — 2012. — № 5. — С. 26–31.
2. Бегичев С. В., Гойчук А. П. Обоснование целесообразности применения шахтных геофизических методов прогнозирования малоамплитудной тектоники // ГИАБ. — 2003. — № 1. — С. 83–84.
3. Rogova T. B. and Shakleин S. V. Adjustment of the exploration grids and its use to increase the reliability of geological models of coal deposits, Vth Int. Innovative Min. Symp., 2020, Vol. 174. — 01063.
4. Trushnikov V. N. An estimate of the error of the approximate solution obtained by a non-linear regularizing algorithm, USSR Computational Mathem. Mathematical Physics, 1982, Vol. 22, No. 1. — P. 239–244.
5. Freedman D. and Diaconis P. On the histogram as a density estimator: L2 theory, zeitschrift für wahr-scheinlichkeitstheorie und verwandte gebiete, 1981, Vol. 57, No. 4. — P. 453–476.
6. Scott D. W. On optimal and data-based histograms, Biometrika, 1979, Vol. 66, No. 3. — P. 605–610.
7. Sturges H. A. The choice of a class interval, J. American Statist. Associat., 1926, Vol. 21, No. 153. — P. 65–66.

Поступила в редакцию 18/V 2022

После доработки 16/VI 2022

Принята к публикации 30/VI 2022