

УДК 622.273

Кандидаты техн. наук ЕФРЕМОВ И.А. (АП «шахта им. А.Ф.Засядько»),
ПИЛЮГИН В.И., ВАСИЛЕЦ А.А., инж. КОЧИН А.Е. (ДонНТУ)

ОЦЕНКА СЛОЖНОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РЕЛЬЕФА РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Рациональное планирование развития горных работ на сверхглубинах невозможно без достоверного прогноза условий отработки на основе анализа особенностей геологического рельефа разрабатываемых угольных пластов. В настоящее время эти особенности отражаются на гипсометрических планах, построенных по данным геологоразведки. Эти планы не корректируются в период работы шахты по данным маркшейдерских замеров в горных выработках, а, следовательно, не могут служить исходными данными для достоверного геомеханического прогноза.

В работе [1] описаны принципы и методика построения и визуализации так называемого виртуального геологического рельефа, т.е. сложной объемной поверхности, описывающей залегание пласта в горном массиве с минимальными отклонениями от природы. Суть этой процедуры состоит в том, что на основе данных геологоразведки и маркшейдерских замеров в горных выработках на отработанных участках формируется специальная база данных, состоящая из триад чисел x , y и z , отражающих координаты расположения точек поверхности угольного пласта в горном массиве. Затем на основе степенных полиномов Чебышева определенным образом подбирается уравнение криволинейной поверхности, проходящей через эти точки, либо очень близко к ним. Решая это уравнение можно строить карты любых геометрических параметров, отражающих расположение пласта в массиве.

В результате визуализации аппроксимирующей геологический рельеф поверхности можно получить достоверную качественную картину пространственного положения угольного пласта в массиве, представить и понять форму его залегания на отдельных участках, построить разрезы по любым направлениям и т.д. Однако, для прогнозирования геомеханических условий разработки необходимо иметь критерий, который связывает *форму геологического рельефа с параметрами напряженно-деформированного состояния нетронутого горного массива*.

Сформулируем общие требования к такому критерию. Во-первых, он не может быть абстрактным, т.е. должен иметь ясный физический смысл. Во-вторых, критерий, являясь характеристикой геометрии расположения пласта, должен легко и достаточно просто определяться для конкретных условий. В-третьих, желательно чтобы он позволял оценивать сложность рельефа как в точке (зоне) шахтного поля, так и интегрально по всей его площади.

В геологии разработано достаточно большое количество критериев оценки сложности геологического рельефа. Их условно можно разделить на две большие группы. Первая группа — это критерии, основанные на представлении поверхности пласта в виде совокупности пересекающихся плоскостей [2–5]. Назовем их линейными. Вторая группа — это критерии, вычисление которых основано на криволинейных поверхностях [6–9], т.е. нелинейные.

Линейные критерии не могут представлять интереса с точки зрения решения поставленной задачи. Дело в том, что в конечном итоге они отражают величину, связанную с углом наклона пласта в точке или зоне. Это неизбежно приводит к скачкообразному изменению величины критерия при переходе от одной аппроксимирующей плоскости к другой. Кроме того, линейные критерии, т.е. величины, основанные

на определении первой производной, отражают только изменение положения тела, а не изменение его линейных размеров (деформацию). В связи с этим, на их основе невозможно прогнозировать состояние горного массива. Практика ведения горных работ полностью подтверждает эти выкладки. При выдержанном угле падения отработка горизонтального пласта и пласта с углом наклона 15° при прочих равных условиях не отличаются в плане интенсивности геомеханических проявлений и процессов. Вместе с тем, если этот угол будет изменяться хотя бы на 5° в пределах ограниченной по площади части шахтного поля, то при отработке пласта в этой зоне неизбежно возникают существенные осложнения [10].

Наибольшее количество известных нелинейных критериев [6, 7, 9] основано на построении геологических разрезов вдоль тех или иных линий в пределах шахтного поля. После этого определяются либо минимальные радиусы кривизны полученных линий [6], либо вычисляется отношение изменения высоты складок геологического рельефа к их ширине [7]. Чем меньше по величине эти параметры, тем сложнее геологический рельеф. Общим недостатком описанных подходов является неопределенность в выборе положения разрезов, которые используются для оценки рельефа. В связи с этим, они, безусловно, заслуживают внимания, но не могут быть применены в готовом виде для решения поставленной задачи.

Как известно, горный массив представляет собой совокупность параллельно расположенных, граничащих друг с другом породных слоев, сдеформированных в результате длительных геологических процессов. Из фундаментальных положений теории упругости известно, что нормальные напряжения, возникающие при изгибе плиты, определяются кривизной их поверхности в рассматриваемой точке. В самом деле, главные горизонтальные напряжения σ_1 и σ_2 , лежащие в плоскости плиты можно определить по следующим зависимостям [11]:

$$\sigma_1 = \frac{Eh}{1-\nu^2}(K_1 + \nu K_2); \quad \sigma_2 = \frac{Eh}{1-\nu^2}(K_2 + \nu K_1), \quad (1)$$

где E — модуль упругости; h — толщина упругой плиты; ν — коэффициент Пуассона; K_1, K_2 — главные кривизны в рассматриваемой точке плиты.

Как видно из выражений (1) величины горизонтальных напряжений зависят от упругих постоянных материала плиты E и ν , ее толщины h и главных кривизн K_1 и K_2 . Последние представляют собой деформации изгиба плиты, т.е. **по сути дела переменные, определяющие величину действующих напряжений**. С другой стороны кривизны K_1 и K_2 являются важнейшими параметрами геометрии криволинейной поверхности плиты, т.к.:

$$K_1 = \frac{1}{R_1}; \quad K_2 = \frac{1}{R_2}, \quad (2)$$

где R_1 и R_2 — радиусы кривизны поверхности плиты в рассматриваемой точке по взаимно перпендикулярным направлениям.

Таким образом, главные кривизны связывают напряженное состояние и геометрию, а, следовательно, могут связать геологический рельеф с геомеханикой. Это отвечает главному требованию, предъявляемому к критерию сложности геологического рельефа и является его главной функцией.

Кривизны K_1 и K_2 представляют собой две компоненты тензора общей кривизны K_0 в произвольной точке поверхности плиты (геологического рельефа). Ее величина определяется из следующего выражения:

$$K_0 = \sqrt{K_1^2 + K_2^2}. \quad (3)$$

Эту физическую величину можно использовать в качестве критерия сложности геологического рельефа.

Проанализируем степень соответствия K_0 остальным трем требованиям, предъявляемым к критерию.

1. Критерий K_0 представляет собой общую деформацию плиты при изгибе в конкретной точке, определяющую уровень горизонтальных напряжений σ_1 и σ_2 . Таким образом, он имеет четкий и понятный **физический смысл**.

2. Величины кривизн K_1 и K_2 **можно легко определить**, зная уравнение аппроксимирующей геологический рельеф поверхности $z=f(x,y)$. Так, из физического смысла второй производной вытекает, что:

$$K_1 = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}; \quad K_2 = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}.$$

Следовательно, для вычисления K_1 и K_2 необходимо найти вторые частные производные уравнения виртуального рельефа и подставить в него координаты конкретной точки поверхности пласта. Полученные значения будут соответствовать длине векторов K_1 и K_2 , направленных соответственно по осям x и y . При этом они могут иметь разные знаки.

3. После определения значений критерия K_0 в отдельных точках угольного пласта, мы получаем своего рода поле его изменения, которое можно использовать для **интегральной оценки сложности геологического рельефа шахтного поля в целом**. Для этого с использованием численных методов производится определение среднего значения критерия на исследуемом участке пласта либо по всей площади шахтного поля.

Таким образом, абсолютная величина кривизны геологического рельефа K_0 удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к критерию оценки его сложности.

На рис. 1 представлены карты изменения критерия K_0 в пределах шахтных полей по пласту m_3 шахт им. А.Ф.Засядько (рис. 1, а) и им. В.М.Бажанова (рис. 1, б). Анализ первой из них показывает, что величина K_0 изменяется от 0 до 0,64. Зоны с низкими значениями критерия ($K_0 \leq 0,05$), представляющее собой практически плоские участки, неравномерно разбросаны по площади шахтного поля. Однако, в основном они приурочены к восточной и центральной его частям. Максимальные значения критерия ($K_0 \geq 0,5$), соответствующие радиусу кривизны поверхности менее 2 км, наблюдаются вблизи ограничивающей шахтное поле флексуры. Восточное крыло характеризуется неравномерным изменением критерия в пределах от 0 до 0,25. В целом можно говорить о наличии достаточно выраженной пликативной складчатости этого крыла и шахтопласта в целом.

В пределах шахты им. В.М.Бажанова складчатость выражена значительно более слабо. Так, примерно на 85% площади поля критерий K_0 изменяется всего от 0 до 0,05. Зоны повышенной кривизны ($K_0 = 0,1 \div 0,5$) оконтуривают относительно узкой полосой (300–500 м) верхнюю и боковые границы шахтопласта. Причем, первая является зоной его перегиба между шахтами «Чайкино» и им. В.М.Бажанова, а вторые примыкают к крупным геологическим нарушениям.

Для решения ряда практических задач важно знать, какую форму имеет геологический рельеф угольного пласта в конкретной зоне. Для ее оценки проанализируем

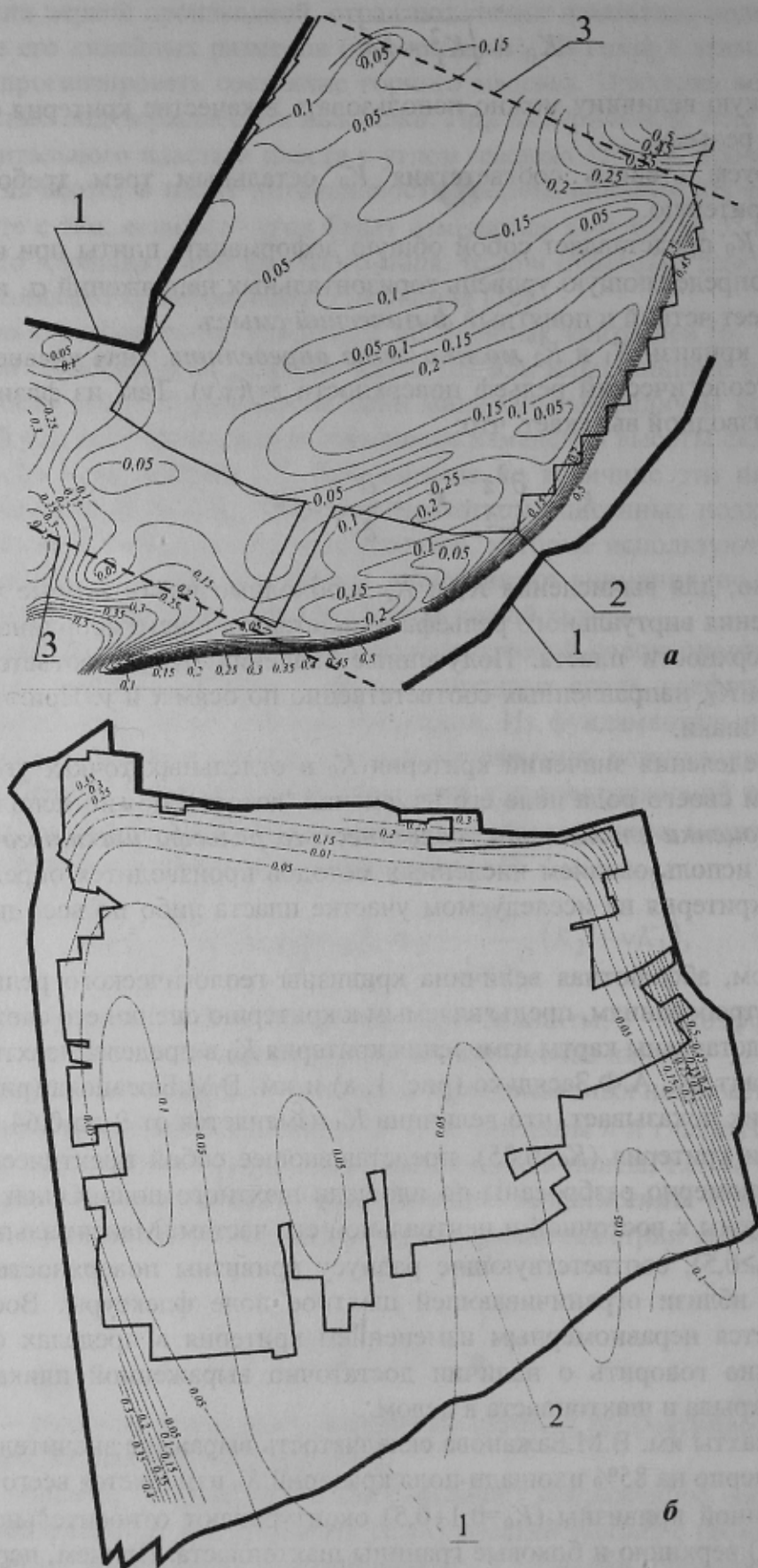


Рис. 1. Карты изменения критерия сложности геологического рельефа K_0 пласта m_3 :
 а — в пределах шахтного поля шахты им. А.Ф.Засядько; б — то же, для шахты им.
 В.М.Бажанова; 1 — границы полей; 2 — границы выработанных пространств; 3 — гра-
 ницы применимости модели

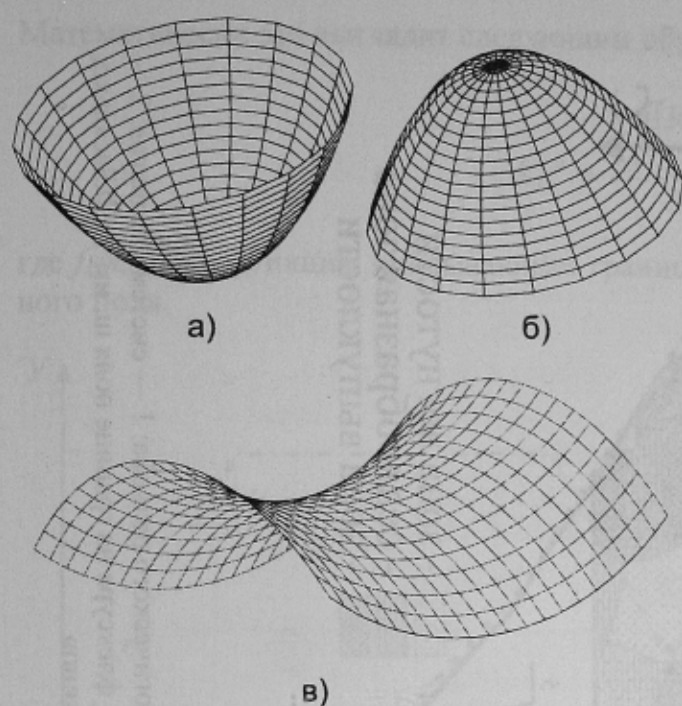


Рис. 2. Формы геологического рельефа: а — вогнутая; б — выпуклая; в — седлообразная

знаки ($K_1 < 0, K_2 > 0$ или $K_1 > 0, K_2 < 0$) отражает так называемую седлообразную форму геологического рельефа, когда центры описывающих окружностей расположены над- и под- рассматриваемым угольным пластом (рис. 2, в). В механике деформации растяжения, приводящие к седлообразной форме тела, считаются наиболее опасными, приводящими к максимальной вероятности разрушения или потере устойчивости. Выделим описанные выше виды геологического рельефа в пределах рассмотренных шахтных полей по пласту m_3 .

На рис. 3 показана общая схема расположения шахтных полей Донецко-Макеевского района по пласту m_3 . Для шахт им. А.Ф.Засядько и им. В.М.Бажанова на ней приведены карты, отражающие ранее описанные три основных вида формы геологического рельефа. Их анализ подтверждает уже отмеченные факты наличия достаточно интенсивной и, главное, сложной складчатости пласта в поле шахты им. А.Ф.Засядько. Так, восточная и центральная его части представляют собой впадину V-образной формы. На западе с приближением к ограничивающей поле флексуры 5 она сменяется выпуклым или седлообразным рельефом, который является основной причиной усложнения условий отработки пласта в этом крыле. Эти особенности хорошо согласуются с данными практики. Форма рельефа поля шахты им. В.М.Бажанова является более простой. Она представляет собой чередующиеся в шахматном порядке выпуклые и вогнутые участки, соединенные зонами с седлообразным залеганием пласта. В западном крыле с приближением к нарушениям 2 и 3 также выделяется зона четко выраженной выпуклости. В ней отмечена повышенная склонность пласта к ГДЯ. В целом можно отметить «индивидуальность» геологических рельефов этих шахт.

Для интегральной оценки сложности геологического рельефа в пределах шахтного поля необходимо просуммировать значения критерия K_0 в его отдельных точках и разделить полученную величину на общую площадь шахтопласта.

свойства критерия K_0 . В зависимости от величин и знаков кривизн K_1 и K_2 возможно три принципиально различных варианта формы геологического рельефа (рис. 2). Случай, когда $K_1 > 0, K_2 > 0$ и $K_1 \neq K_2$ физически отражает геологический рельеф вогнутой формы, когда центры окружностей соответствующих радиусов R_1 и R_2 расположены выше плоскости пласта. Эта форма представляет собой эллипсоидальную впадину. Если $K_1 = K_2 > 0$, то она будет иметь шаровидную форму (см. рис. 2, а). Аналогично, в случае, если $K_1 < 0, K_2 < 0$ и $K_1 \neq K_2$, геологический рельеф представляет собой выпуклый эллипсоид. При этом оба центра описывающих окружностей расположены под пластом (см. рис. 2, б). И, наконец, случай, когда главные кривизны имеют разные

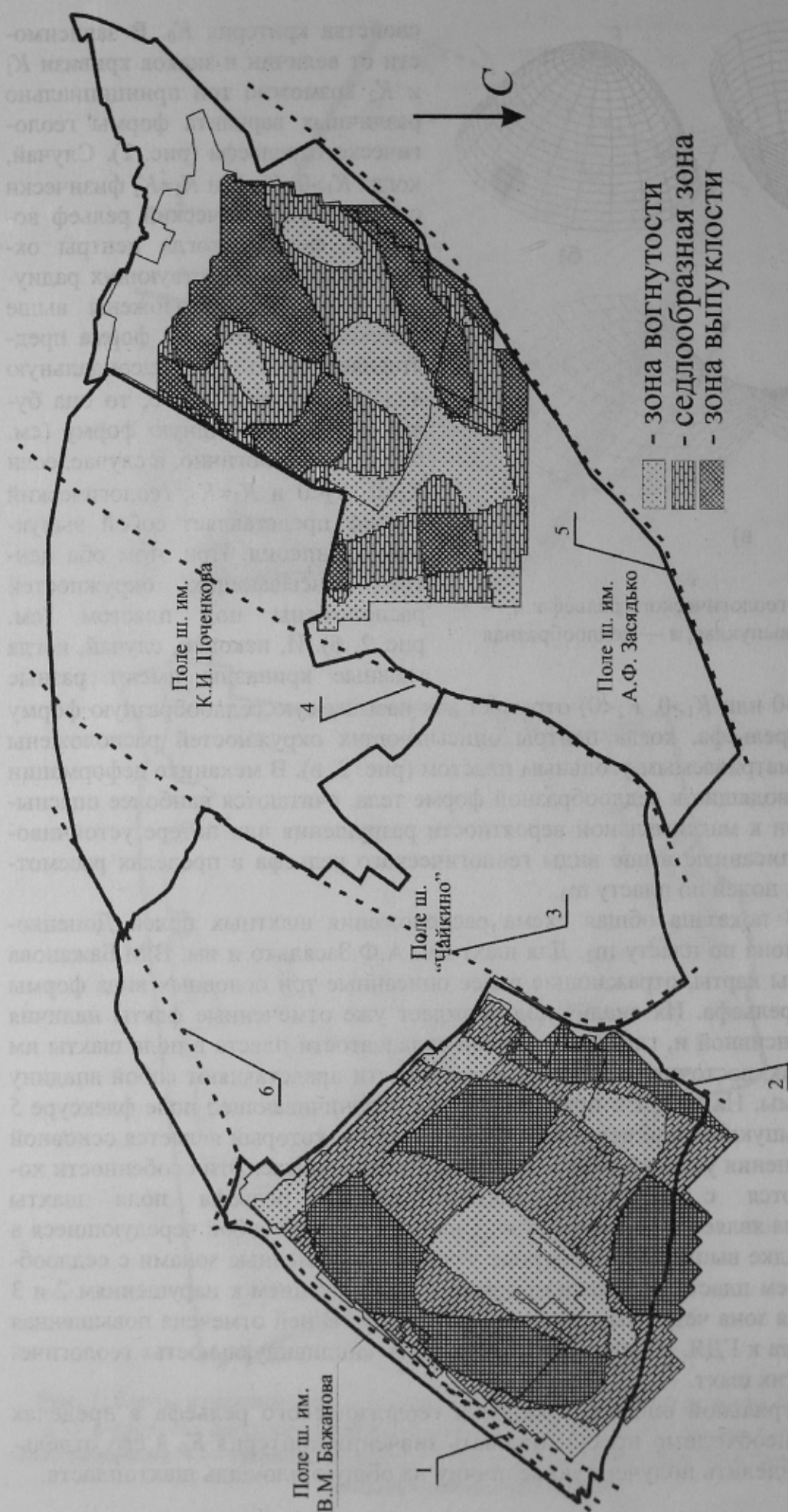


Рис. 3. Схема расположения шахтных полей по пласту m_3 и зон с различной формой геологического рельефа: 1 — система надвигов; 2 — ветвь Григорьевского надвига; 3 — Безыменный надвиг; 4 — Григорьевский надвиг; 5 — флексура на границе поля ш. им. А.Ф.Засядько; 6 — геологическое нарушение в поле ш. «Чайкино»

Математически это выглядит следующим образом:

$$K_0^u = \frac{\iint K_0 dx dy}{S_{\Pi}}, \quad (4)$$

где $f_1(x, y)$ — функция, описывающая границы шахтного поля, S_{Π} — площадь шахтного поля.

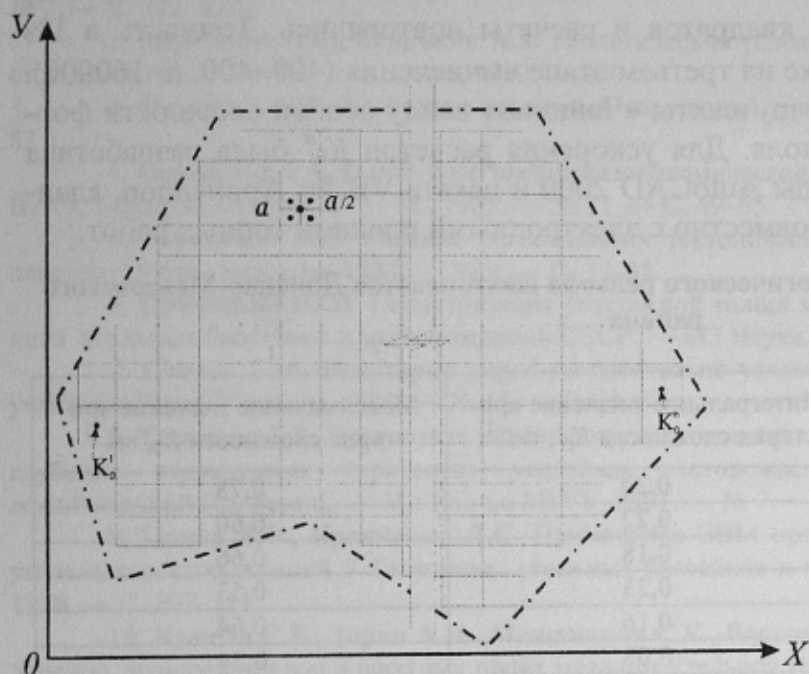


Рис. 4. Расчетная схема приближенного определения значения интегрального коэффициента сложности K_0^u

ляются значения критерия K_0 в точках шахтного поля, расположенных в центрах квадратов $K_0^1, K_0^2, \dots, K_0^n$.

3. Предполагаем, что значения критерия K_0 в пределах площади каждого квадрата постоянно и равно соответствующему его значению из совокупности $K_0^1, K_0^2, \dots, K_0^n$.

4. Определяем интегральный показатель сложности рельефа, как следующую величину:

$$K_0^u = \frac{\sum_{i=1}^n K_0^i}{n}$$

5. Затем уменьшаем сторону квадрата в два раза, и заново выполняем операции п.п. 2–4.

6. Полученное значение интегрального показателя со стороной квадрата $a/2$ сравнивается с предыдущим и определяется разница между ними ΔK_0^u .

7. Вычисление значения K_0^u прекращаются, если величина его изменения при последующем уменьшении стороны квадрата ΔK_0^u не превышает приведенной

Учитывая, что функция $z=f(x,y)$ представляет собой степенной полином Чебышева, состоящий из нескольких десятков слагаемых, аналитически решить интеграл (4) не представляется возможным. В связи с этим, была сделана попытка найти его приближенное значение следующим образом:

1. Шахтное поле разбивается на совокупность из n квадратов со стороной a из расчета наиболее полного его покрытия (см. рис 4).

2. Используя функцию аппроксимирующей геологический рельеф поверхности $z=f(x,y)$, определяем

ошибки отклонения виртуального геологического рельефа от реального ($\approx 1\%$), либо заранее заданной точности.

Расчеты интегрального критерия сложности выполнялись для условий 7 шахтопластов шахт Донецко-Макеевского района. Размеры шахтных полей изменялись от 1,7 до 6,5 км по простиранию и от 2,5 до 9,0 км по падению. В связи с этим на первом этапе их форма приводилась к форме квадрата. Затем поля разбивались на 10000 (100×100) элементарных квадратов, выполнялись расчеты критерия в их центрах, и производилось определение величины K_0'' . На втором этапе поля делились на 40000 (200×200) элементарных квадратов и расчеты повторялись. Точность в 1% обеспечивалась, как правило, уже на третьем этапе вычисления (400×400 , $n=160000$). Исключением был только пласт m_3 шахты «Чайкино» ввиду особой сложности формы и геологического рельефа поля. Для ускорения расчетов K_0'' была разработана специальная программа для среды AutoCAD 2000 и пакета VB for Application, адаптированная для использования совместно с электронными планами горных работ.

Таблица. Оценка сложности геологического рельефа шахтопластов Донецко-Макеевского района

Шахта	Индекс пласта	Интегральное значение критерия сложности K_0'' , км ⁻¹	Максимальное значение критерия сложности K_0 , км ⁻¹
«Куйбышевская»	k_8	0,20	0,78
им. А.Ф.Засядько	k_8	0,22	0,60
	l_1	0,18	0,66
	l_4	0,23	0,53
	m_3	0,16	0,64
им. В.М.Бажанова	m_3	0,05	0,54
«Чайкино»	m_3	0,27	1,10

В таблице представлены значения критерия сложности геологического рельефа отдельных шахтных полей Донецко-Макеевского района. Величина интегрального значения K_0'' для этих условий изменяется в пределах от 0,05 до 0,27 км⁻¹. Максимальные значения критерия K_0 в точках (зонах) значительно выше и имеют разброс от 0,21 до 1,1 км⁻¹, что соответствует радиусу кривизны поверхности от 0,9 км до 5,0 км. Интегральное значение критерия по пласту m_3 для шахт им. В.М.Бажанова, им. А.Ф.Засядько и «Чайкино» соответственно составляют 0,05, 0,16 и 0,27 км⁻¹. Их соотношение хорошо отражает соотношение сложности условий разработки пласта на этих шахтах, известное из практики ведения горных работ.

Выводы:

1. В качестве критерия сложности геологического рельефа разрабатываемых угольных пластов целесообразно использовать абсолютное значение общей кривизны поверхности их залегания K_0 в исследуемой точке. Эта величина связывает геометрию рельефа с параметрами напряженно-деформированного состояния нетронутого горного массива, а, следовательно, может использоваться для геомеханического прогноза условий отработки и определения расположения аномальных зон геологического происхождения.

2. Оценка формы геологического рельефа может быть основана на анализе знаков главных кривизн K_1 и K_2 в пределах площади шахтного поля. При этом можно выделять выпуклые, вогнутые и седлообразные участки залегания пласта.

3. На основе предложенного критерия сложности K_0 можно производить интегральную оценку геологического рельефа шахтных полей, позволяющую сравнивать условия разработки как на стадии проектирования горных работ, так и на стадии разработки шахтопластов.

Библиографический список

1. Дворников В.И., Пилюгин В.И., Кочин А.Е. Математическая модель пространственного расположения угольного пласта в горном массиве // Изв. Донецкого Горного института, 2002. — № 2. — С. 112–116.
2. Забигайло В.Е., Широков А.З. Геологические условия выбросоопасности угольных пластов Донбасса. — К.: Наукова думка, 1980. — 250 с.
3. Осецкий А.И. Выявление вероятных нарушений и выбросоопасных зон. — К., 1973. — 83 с.
4. Привалов В.А. О прогнозе тектоногазодинамической обстановки угольного пласта // Изв. Вуз. Геология и разведка. — М., 1985. — № 11. — С. 49–55.
5. Забигайло В.Е. Влияние региональных тектонических процессов на выбросоопасность пластов // Уголь Украины, 1984. — № 9. — С. 37–38.
6. Приходько Ю.Н. Геометризация угленосной толщи методом радиусов кривизны // Тектоника угольных бассейнов и месторождений СССР. — М.: Наука, 1976. — С. 255–260.
7. Стовас Г.М. Некоторые горно-геологические условия детальной разведки Ольховского участка // Уголь Украины, 1983. — № 11. — С. 35–37.
8. Тищенко Т.В. Прогнозная инженерно-геологическая оценка безопасности горных работ на глубоких структурных горизонтах угольных месторождений. // Горный информационно-аналитический бюллетень. — М.: Изд-во МГТУ, 2001. — № 7. — С. 97–100.
9. Попов В.В., Кравченко Л.С. Применение ЭВМ при изучении тектонического строения угольных месторождений // Тектоника угольных бассейнов и месторождений СССР. — М.: Наука, 1976. — С. 307–311.
10. Кужель С.В., Зорин А.Н., Мещаников С.К., Вдовиченко В.П., Светличный В.Н. Определение техногенных зон в шахтных полях методом удельной изменчивости уклонов // Уголь Украины, 2002. — № 9. — С. 6–8.
11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. — М.: Наука, 1965. — 202 с.

© Ефремов И.А., Пилюгин В.И., Василец А.А., Кочин А.Е., 2003