

УДК 622.272.63.001.18:681.3.06

Асп. О.А. Жорушкина
(ИГТМ НАН Украины)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТУННЕЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ВЫБРОСОПАСНОСТИ УГЛЯ

Виконано обґрунтування використання методів тунельної мікроскопії при прогнозуванні викиднебезпечності вугілля.

THE USING OF THE TUNNEL MICROSCOPY METHODS AT PROGNOSIS OF THE COAL OUTBURSTS DANGER

The validity of the tunnel microscopy methods using at prognosis of the coal outbursts danger is executed.

Среди природных факторов, вызывающих внезапные выбросы угля и газа, структура угля часто является самым изменяющимся параметром, который определяющим образом характеризует вероятность выброса. Поэтому постоянное наблюдение за структурой угля в пласте может явиться хорошим прогнозным признаком вероятной степени выбросоопасности пласта.

Анализ работ Н.Б. Вассоевича, Д.П. Григорьева, Х.Ф. Джамаловой, Н.П. Ермакова, В.А. Корчемагина, Г.В. Карповой, В.Н. Нагорного, Ю.Н. Нагорного, А.Я. Радзивилла, Н.М. Страхова, В.В. Ходота, И.Л. Эттингера и других исследователей [1-3], посвященных структурным преобразованиям углей, показывает недостаточную информативность методов исследования структурных преобразований углей, основанных на физико-химических и механических свойствах твердых органических топлив.

До настоящего времени при получении информации о комплексных параметрах структуры и вещественном составе углей различной степени катагенеза с помощью различных методов исследований не учитывался фактор влияния электрических полей на структуру горных пород. Для расширения информативной базы о структуре (с целью установления степени дефекта структуры выбросоопасных углей для прогноза внезапных выбросов) и вещественном составе углей в настоящее время разрабатываются новые методы изучения углей, использование которых позволяет учитывать эффекты взаимодействия электрических полей с поверхностью углей. Одним из таких методов является метод туннельной микроскопии, с использованием которой устанавливаются электростатические особенности поверхностной структуры горной породы.

Применение указанного метода с целью исследования структуры углей различной степени катагенеза позволяет расширить информативную базу при прогнозе вероятности их выбросоопасности.

Нами исследовались выбросоопасные угли марки Г, ГЖ (пласт h, шахта им.

А.Г. Стаханова) с помощью туннельного микроскопа SCPM, режимные характеристики которого были следующими:

– общее поле сканирования: по координате X – 7209 Å, по координате Y – 7209 Å;

– локальное поле сканирования: по координате X – 88 Å, по координате Y – 88 Å (масштаб по X – 88 Å, по Y – 88 Å);

– расстояние до иглы: 12 Å;

– подаваемое напряжение на иглу: 0 - 10 В;

– шаг сканирования по напряжению: 0,1 U, где $U = 3.1 \frac{A}{мс}$.

Изображение в реальном времени регистрировалось на дисплее компьютера. Наличие обратной связи пьезоколебаний по оси Z, позволяло «скользить» зонду по поверхности угля не превышая расстояния 12 Å.

На рис. 1 приведено изображение поверхности выбросоопасного угля (марка Г, ГЖ, пласт I₁ шахта им. А.Г. Стаханова), реперные точки изображения соответствовали распространению электрических зарядов по поверхности угля. Чернота сгущения точек зондирования характеризовала степень проникновения тока в глубину межмолекулярного пространства и определялась по шкале почернения в диапазоне 0 - 37 Å.

Из рис. 2 видно, что исследуемая поверхность образована пространственным наложением двух волн, распространяющихся перпендикулярно друг другу (соответственно по оси X и Y). На рис. 2 представлены характеристики профилей этих волн. Вверху показана волна распространения электрических зарядов по оси $y \rightarrow Z_1 = \cos(x)$ и по оси $x \rightarrow Z_2 = \cos(3x)$.

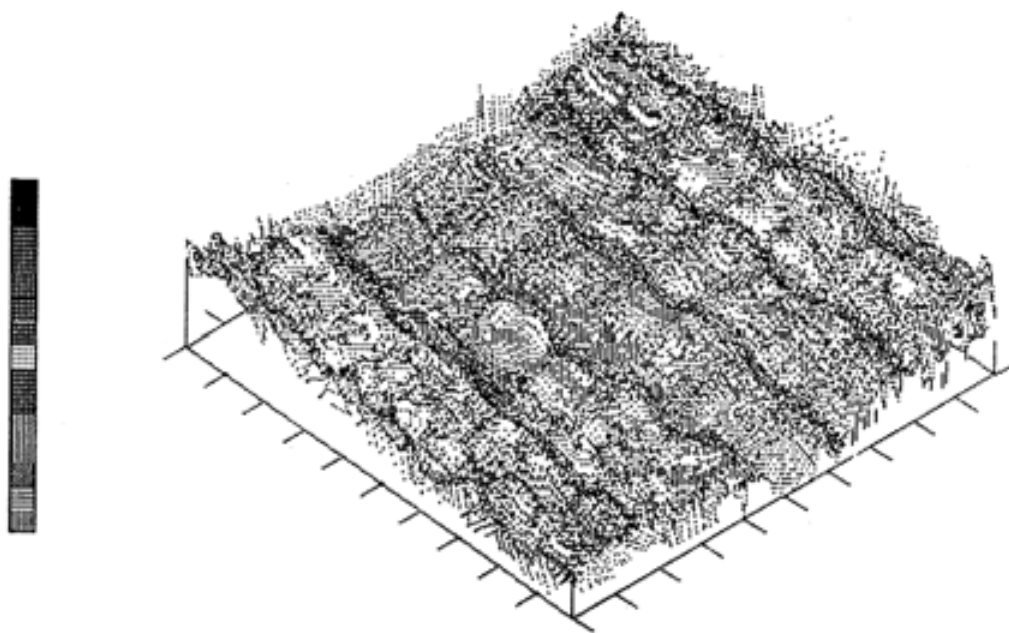


Рис. 1 – Реконструированная поверхность выбросоопасного угля марки Г, масштаб по X – 88 Å, по Y – 88 Å

Особенностями формирования поверхности является тот факт, что гармонические колебания волн, распространяющихся по осям X и Y, являются модулированными со случайными фазами, обусловленными флуктуациями колебаний кристаллических решеток.

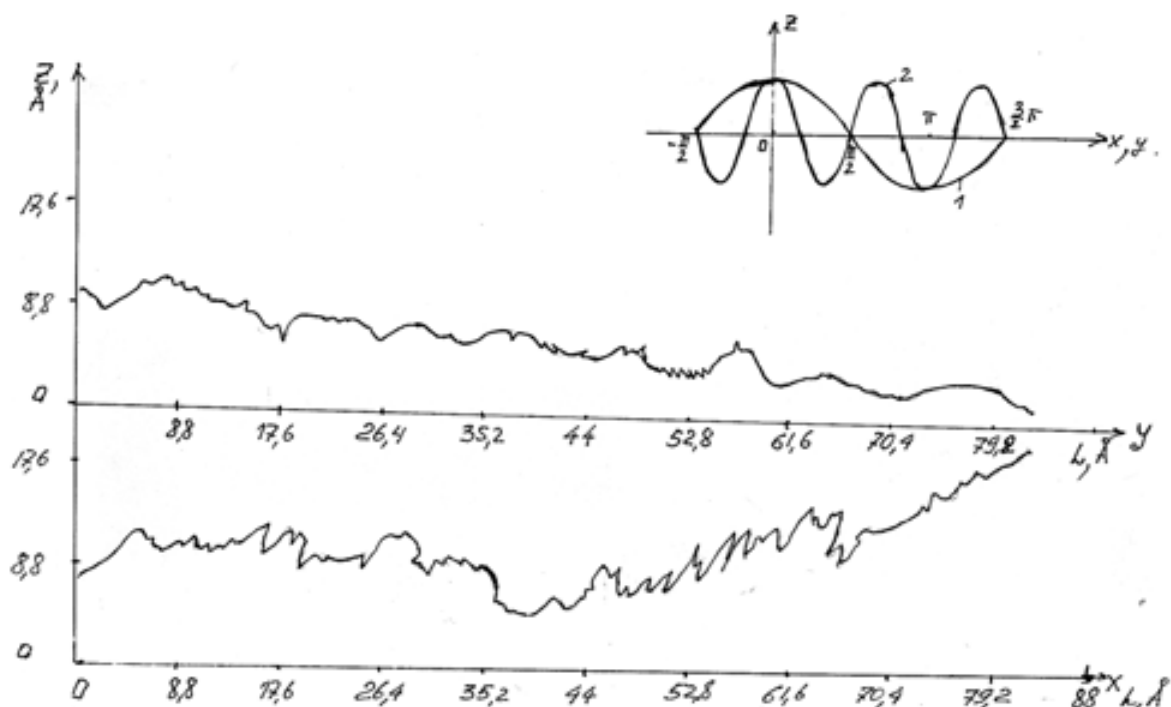


Рис. 2 – Профиль волн, распространяющихся по осям X и Y, (вверху реконструированные волны по оси Y (1) и оси X (2))

На первом этапе исследований производился расчет количества взаимодействия волновых функций (игла – поверхность угла). Для оценки электрических характеристик условно принято, что волновая функция соответствовала заряду электрона $\sim 1,6 \times 10^{-19}$ Кл. Данное утверждение довольно активно обсуждается в теоретических работах [4 - 7] и в соответствии с литературными данными значение волновой функции может отличаться от заряда электронного газа на 2-3 порядка. Таким образом, для оценки минимального поверхностного заряда было принято, что $|\psi| \sim$ соответствует заряду электрона. На площади сканирования, таким образом, $(88 \text{ \AA} \times 88 \text{ \AA})$ было сосредоточено $\sim N=13516e$, что соответствовало:

$$1.3516 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^4 \approx 2.16256 \times 10^{-15} \text{ Кл} \approx 2.2 \times 10^{-15} \text{ Кл} . \quad (1)$$

Плотность поверхностного заряда была соответственно:

$$\sigma = \frac{2.2 \times 10^{-15} \text{ Кл}}{7.744 \times 10^{-20} \text{ м}^2} = 0,28 \times 10^5 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} . \quad (2)$$

Как следует из [8] напряженности электрического поля бесконечной по-

верхности соответствовала величина:

$$\Delta E = 4\pi\sigma \quad (3)$$

то есть

$$E \approx 0.28 \times 10^5 \times 4 \times 3.14 = 3.5 \times 10^5 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}, \quad (4)$$

а разность потенциалов была порядка величины:

$$\Delta\phi = -Edl \approx -3.5 \times 10^5 \times 8.8 \times 10^{-10} = 30.8 \times 10^{-5} \text{ В} \approx 0,3 \text{ мВ}. \quad (5)$$

Для оценки величины наведенных микротоков примем (в соответствии с результатом работы [9]) удельное сопротивление угля (витрена и кларена стр. 293 [9]) $\sim 3 \times 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, тогда в объеме исследуемого угля формируются токи величиной $\sim 9 \times 10^{-20} \text{ А}$. Величины флуктуаций тока $\sim 10^{-20} \text{ А}$ практически не вносят коррективов в пондермоторные силы, связанные с изменением силовых характеристик микрообъемов. Однако при незначительном увеличении напряженности, связанной со стохастическими электрическими полями, в связи с тем, что пондермоторная сила $f_n \approx \text{grad}E^2$, токи возрастают на 5-10 порядков.

Кроме того, нами исследовалась поверхностная плотность электрических зарядов для установления величины ее фрактальной размерности, которая полностью определяется положением волн, формирующихся по осям X и Y (см. рис. 1 и 2).

Для расчета фрактальной размерности волн распространения электрических зарядов применялась методика описанная в работе [10], а для расчетов фрактальных размерностей кластеров, образованных поверхностными электрическими зарядами, применялась методика вложенных квадратов и степенной корреляции по плотности [11, 12].

Фрактальный анализ основан на том, что многие хаотические структуры, имеют внутренний порядок и, как следствие, обладают степенной корреляцией плотности. Это является результатом симметрии роста этих структур и подразумевает степенную зависимость между массой M и характерным размером кластера R [12]:

$$M \sim R^{D_f} \quad (6)$$

Величина D_f является фрактальной и Хаусдорфовой размерностью. Для фрактального кластера можно ввести корреляционную функцию «плотность-плотность», которая имеет вид [12]:

$$C(\vec{r}) = \frac{1}{N} \sum \rho(\vec{r}_i) \rho(\vec{r}_i + \vec{r}) = \frac{\langle \rho(\vec{r}') \rho(\vec{r}' + \vec{r}) \rangle}{\langle \rho(\vec{r}') \rangle}, \quad (7)$$

где N – число частиц в кластере, i – номер частицы, ρ – плотность, равная единице в точке, занятой частицей, и нулю в незанятой точке. Если сделать усреднение по углам, то корреляционная функция придет в соответствие со средней плотностью частиц на расстоянии r от занятых точек. В соответствии с формулой масса фрактального кластера в сфере радиуса r пропорциональна r^{D_f} , тогда средняя плотность на этом расстоянии пропорциональна r^{D_f-d} , где d – эвклидова размерность пространства. Отсюда вытекает соотношение для корреляционной функции, которое наиболее часто приводится в виде [12]:

$$C(r) \sim r^{-a}, D_f = d - a, \quad (8)$$

где $r_0 \ll r \ll R$, r_0 – размер частиц, из которых составлен кластер. Величина D_f зависит от определенных особенностей процесса роста и дает возможность путем сопоставления с результатами компьютерного моделирования при различных предположениях определить механизм формирования поверхности заряда.

На рис. 3а и 3б показана зависимость $\lg(L)$ от $\lg(a)$ по осям X (3а) и Y (3б), на рис. 3в показана зависимость $\ln(N)$ от $\ln(S)$ для зарядов поверхности угля.

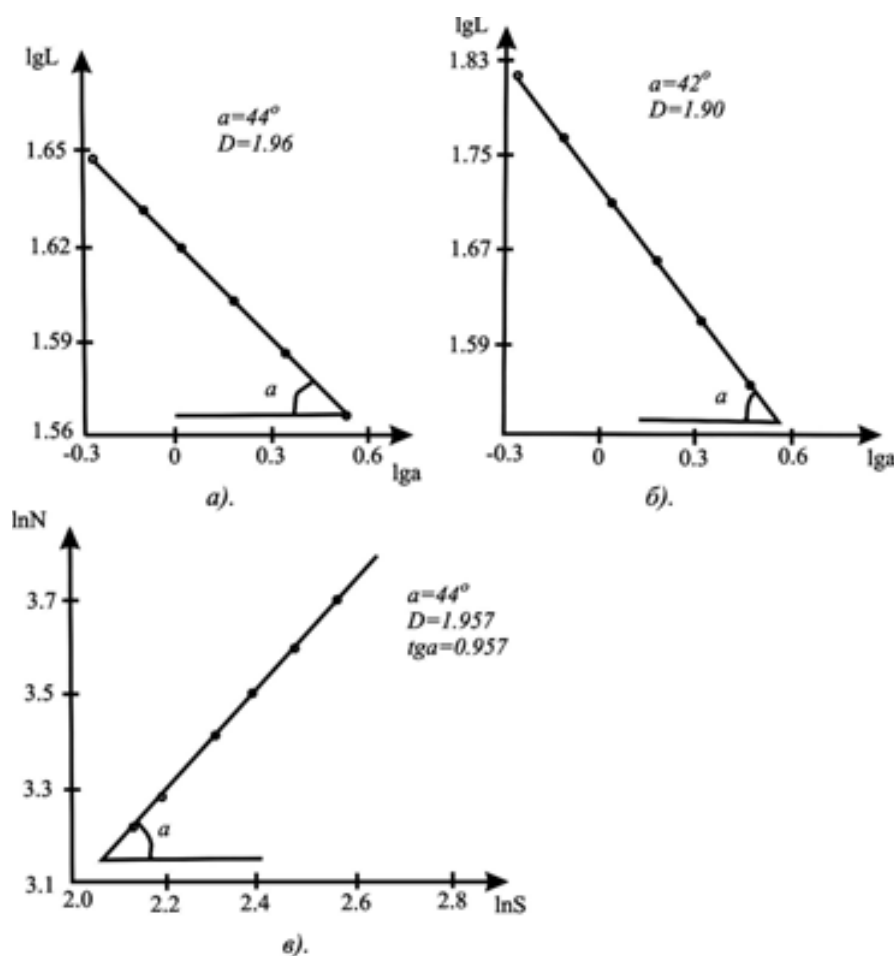


Рис. 3 – Определение фрактальной размерности волн по оси X – б), по оси Y – а), и фрактальной размерности кластерных зарядов поверхности угля марки Г методом вложенных квадратов – в).

Как видно из рисунков фрактальная размерность плотностей поверхностных зарядов совпадала с фрактальной размерностью волн, распространяющихся по осям X и Y, и соответствовала величине $D = 1,9 \pm 0,45$.

Такое совпадение результатов (общей величины формирования размеров) говорит в пользу гипотезы о соответствии формирования структуры и ее электрических свойств характеристикам стохастических силовых полей, которые определялись в свою очередь интенсивностью протекания процессов под действием геологических факторов, направленных на появление субмикротрещин.

На рис. 4 показана зависимость плотности распределения зарядов $\varphi(x)$ от количества площадей $N 8,8 \times 8,8 \text{ \AA}$.

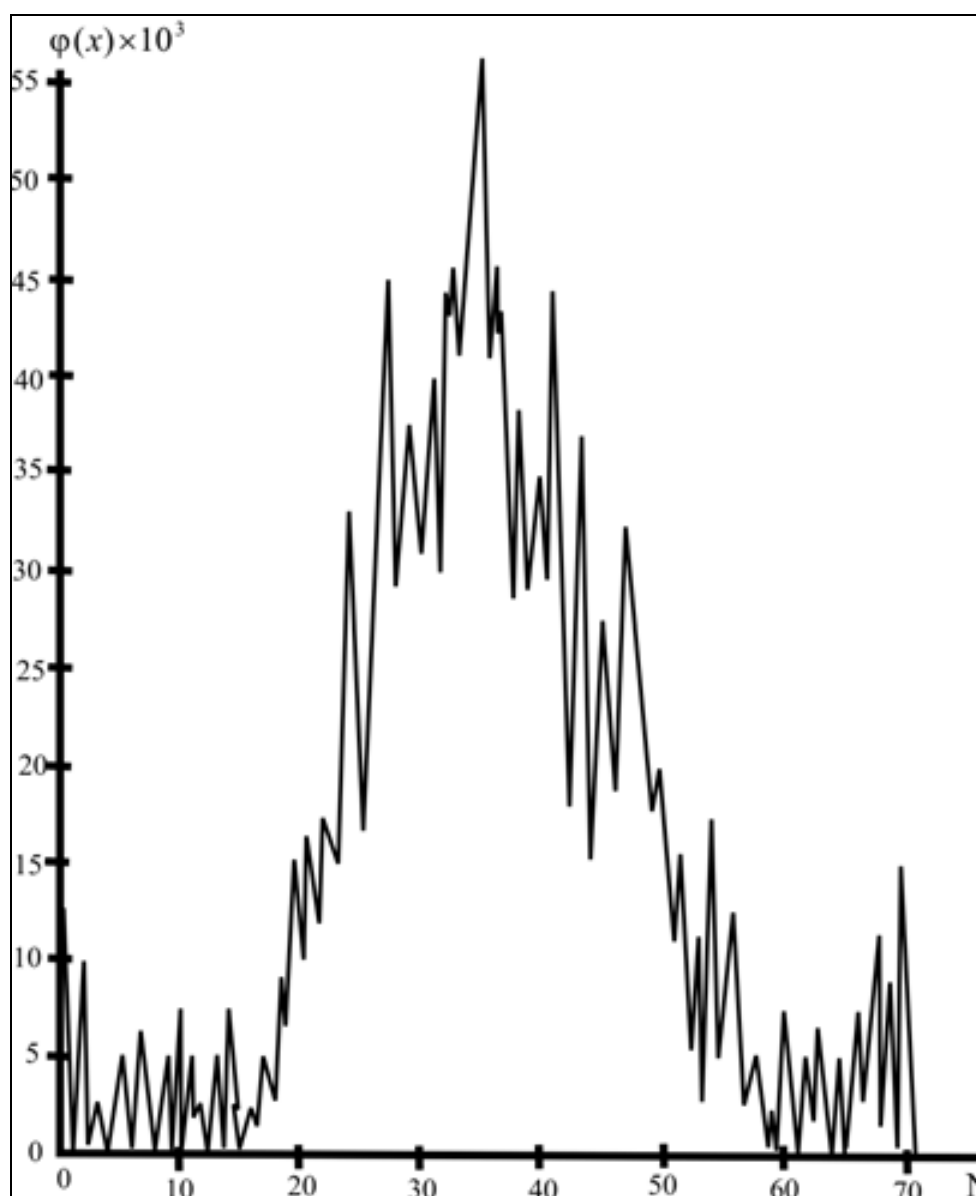


Рис. 4 – Экспериментальная функция плотности распределения вероятности заряда по поверхности выбросоопасного угля марки Г.

$$\varphi(x) \approx \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\bar{x}_i - x)^2}{2\sigma^2}} \quad (9)$$

Интересным является тот факт, что плотность распределения зарядов (представленная на рис. 4) имеет соответствующую фрактальность, равную 1,9.

Для сравнения фрактальных размерностей поверхностных зарядов выбросоопасных углей с фрактальными размерностями агрегированных частиц невыбросоопасных углей марки Г, ГЖ, были рассчитаны (соответствующие микрочастицам) фрактальные размерности «квазичастиц» («квазичастицы» – частицы, имеющие правильную геометрическую форму [13]), которые равны $\sim 1,2 \pm 0,04$. По величине это ниже величины фрактальной размерности плотности распределения зарядов по поверхности выбросоопасного угля. На рис. 5 показаны экспериментальные значения величин плотности распределения вероятностей зарядов по поверхности угля марки Г. На рис. 5 видно развитие распространения поверхностного заряда, которое в свою очередь связано с формированием в угле субмикротрещин. Таким образом, анализ результатов исследований поверхности выбросоопасных углей с использованием туннельной микроскопии позволяет сделать следующие выводы:

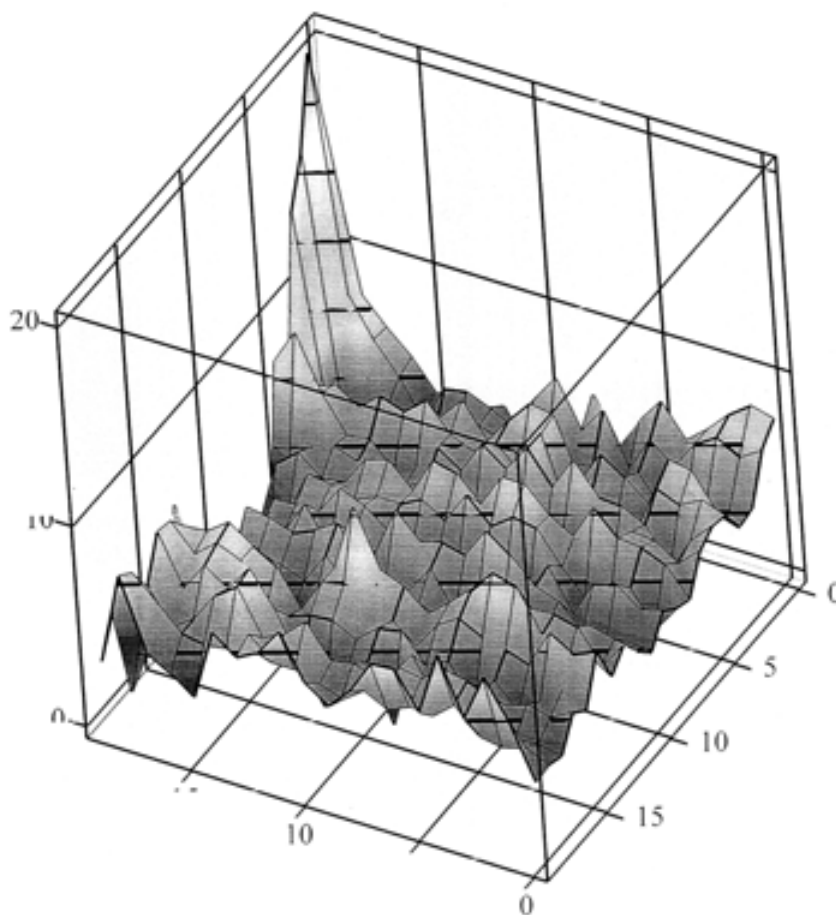


Рис. 5 – Плотность распределения зарядов по поверхности угля в поле $88 \times 88 \text{ \AA}$.

1. Метод микроконтактной микроскопии (с использованием туннельного микроскопа с разрешением $\sim 10 \text{ \AA}$) является информативным с позиций определения вида микроструктуры в масштабах ионного и электронного газа и может являться в совокупности с традиционными методами базовым для исследования и определения микроструктуры выбросоопасных углей.

2. Использование данного метода позволит уточнить ряд теплофизических характеристик углей (таких, например, как удельная проводимость, удельная теплоемкость и т.д.), а также реконструировать микроповерхности различных марок углей с помощью компьютерной техники, что в свою очередь расширит объем знаний в области микроструктуры, направленный на установление механизма явления выбросов и горных ударов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазаренко Е.К., Панов Б.С., Павлишин В.И. Минералогия Донецкого бассейна. Ч.11. Киев, 1975. – 501 с.
2. Ходот В.В. Внезапные выбросы угля и газа. М.: Гос. научно-техн. ид-во лит-ры по горному делу, 1961. – 364 с.
3. Эттингер И.Л. Внезапные выбросы угля и газа, и структура угля. М.: Недра, 1969. – 160 с.
4. Binnig G, Rohrer H. – Sci. Am., 1985. – p. 50.
5. Binnig G, Quate C.F., Gerber C. – Phys. Rev. Letter, 1986, v.56. – P. 930-937.
6. Golovchenko I.A. Science, 1982, v. 232, p. 48 – 56.
7. Quate C.F. – Physics Today, 1986, p.26 – 44.
8. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1989. – 504 с.
9. Агроскин А.А. Физика угля. – М.: Недра, 1965. – 352 с.
10. Федер Е. Фракталы. Пер. с англ. М.: Мир, 1991, – 254 с.
11. Жюлен Р. Фрактальные агрегаты // УФН. – 1989, Т. 157, №2. – С. 339-357.
12. Смирнов Б.М. Физика фрактальных кластеров. М.: Наука, 1991. – 136 с.
13. Баранов В.А. Условия формирования квазикристаллов на примере джеспилитов Кривого Рога // Науковий вісник НГА України. Дніпропетровськ, 2003. – № 4. – С. 59-64.