

ления на участках выработки значительно отличаются как друг от друга, так и от среднего электросопротивления по профилю, которое сейчас и используется для прогнозирования горных ударов. Такой разброс средних электросопротивлений может быть обусловлен различными причинами, в том числе и наличием на профиле трех блоков с различным геологическим строением.

Помимо электрометрических данных за тот же период проведен анализ сейсмических данных. На руднике имеется собственная сейсмостанция. Она обеспечивает наблюдение за всем шахтным полем посредством 16 сейсмоприемников, установленных в разных частях и на разных горизонтах рудника. На рассматриваемом горизонте находится один сейсмоприемник, расположенный в центре шахтного поля и отстоящий от рассматриваемых горных выработок на расстоянии 200-800 м. При оценке удароопасности на горизонте (-350 м) службой прогноза используются данные по энергии сейсмических событий, полученные с данного сейсмоприемника. Поэтому нами проведен перерасчет сейсмической энергии, реально доходящей до разных частей горных выработок. В восточную часть порожнякового квершлага приходит в основном наибольшее количество сейсмической энергии, это является следствием наиболее близкого расположения к взрывным работам, производимым на восточном и юго-восточном участках. В центральную и западную часть выработки при-

ходит уже более слабая волна, что обусловлено её затуханием, отражением и преломлением.

Столь же существенно на изменение электросопротивления влияют сезонные водопритоки. Анализ показал, что электросопротивление в период повышенных водопритоков при исключении других факторов может изменяться в 3-4 раза. Диапазоны изменения электросопротивления с учетом класса сейсмических событий и водопритоков приведены в таблице.

Из результатов проведенного анализа видно, что причиной неудовлетворительных результатов проводимого в последние годы на руднике прогноза удароопасности по электропрофилированию выработок является несовершенство методики измерений, связанной, например, с необоснованным выбором разности измерительных электродов, неучетом изменчивости горно-геологических условий по профилю измерений при расчете средних электросопротивлений и влияние водопритоков на результаты замеров, использование критериев удароопасности по электросопротивлению, установленных для ранее отработанного горизонта. Совершенствование методики измерений и обработки их результатов, а также установление новых критериев удароопасности по электросопротивлению позволит повысить до достаточного надежности прогноза удароопасности по электросопротивлению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Еременко, А. А.* Проведение и крепление горных выработок в удароопасных зонах железорудных месторождений. / А. А. Еременко, А. И. Федоренко, А. И. Копытов. – Новосибирск: Наука, 2008. – 236 с.
2. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях Горной Шории, склонных и опасных по горным ударам // Изд - во ВостНИГРИ. – Новокузнецк: 2001. – 55 с.

Авторы статьи:

Дудко
Константин Львович,
ассистент каф. теоретической и геотехнической механики КузГТУ.
E-mail: constantin.dudko@yandex.ru

Шиканов
Алексей Иванович,
канд. техн. наук, доцент каф. теоретической и геотехнической механики КузГТУ. E-mail: shai.tgm@mail.ru

УДК 622.235(088.8): 519.21

Д. Ю. Сирота, В.В. Иванов

ВОЗМУЩЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ГОРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИХ УДАРОВ В УГОЛЬНОМ МАССИВЕ

При подготовке горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений, очаг которых расположен на сравнительно небольшой глубине, как на земной поверхности, так и в атмосфере возникают заметные аномалии естественного электрического поля, обусловленные зарядовым состоянием трещин при их накоплении в зоне очага [1].

В работах [1, 2] были произведены расчёты

потенциала электрического поля от крупных естественных источников тока, с учётом влияния увлажнённого приповерхностного слоя пород наносного типа, а также одного горизонтального угольного пласта.

В данной заметке будет произведён расчёт напряжённости поля при тех же, что и в [2], условиях.

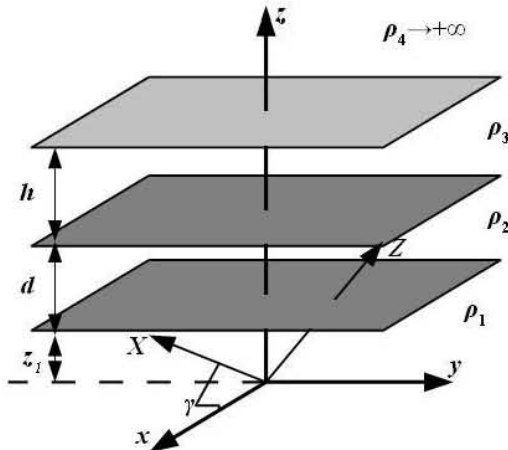


Рис 1. К расчёту напряжённости ЕЭП

Рассмотрим четырехслойное однородное, изотропное пространство с плоскопараллельными границами с УЭС слоев $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4 \rightarrow +\infty$, Ом·м (нумерация слоев идет снизу вверх). Заглубленный точечный источник тока расположен на расстоянии z_1 , м от границы первого и второго слоев. Мощности второго и третьего слоев равны d и h м соответственно (рис. 1). Тогда величина потенциала ЕЭП будет определяться по формуле:

$$\varphi_4 = \frac{I \cdot \rho_3}{2\pi} \cdot \aleph, \quad (1)$$

где $\aleph = \int_0^{+\infty} A(m) J_0(mr) \exp(-mz) dm$,

$$A(m) = \frac{(1 - K_1) \cdot (1 - K_2)}{1 + K_1 \cdot K_2 \cdot q + K_1 \cdot q \cdot s + K_2 \cdot s};$$

$q = \exp(-2md)$, $s = \exp(-2mh)$, I – величина тока точечного источника, А; ρ_i – УЭС i -го слоя, Ом·м; $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ – полярный радиус, м; h, d – мощности промежуточных слоев, м; φ_4 – величина потенциала в четвертом слое, В; $K_i = (\rho_{i+1} - \rho_i) \cdot (\rho_{i+1} + \rho_i)^{-1}$ – коэффициенты отражения границ между i -м и $i+1$ -м слоями;

Для дальнейших вычислений, следуя работе [1], введем новую систему координат $OXyZ$, которая будет повернута вокруг оси Oy на угол γ (рис. 1). Уравнения перехода от старой системы к новой и обратно имеют вид:

$$\begin{aligned} x &= X \cos \gamma - Z \sin \gamma, & y &= Y, & (2) \\ z &= X \sin \gamma + Z \cos \gamma, \end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned} X &= x \cos \gamma + z \sin \gamma, & Y &= y, & (3) \\ Z &= -x \sin \gamma + z \cos \gamma. \end{aligned}$$

Из геодинамики и сейсмологии известно [3], что сейсмические события (горно-тектонические удары, землетрясения) связаны с разломами типа

надвига, сброса и сдвига по простиранию. Образование крупных разломов в земной коре обусловлено множественным накоплением микротрещин в очаговой зоне, их объединением и формированием крупных трещин. Кроме того, известно, что надвиги в земной коре, как правило, образуются под углами к земной поверхности $23^\circ < \gamma < 45^\circ$, а сбросы – $45^\circ < \gamma < 65^\circ$. Поэтому, при расчётах будем считать, что очаговая зона представляет собой эллипсоид с полуосями $A > B > C$, который повернут относительно оси Oy на углы $\gamma = 36^\circ$ и $\gamma = 56^\circ$ (рис. 1). Согласно эмпирическим закономерностям сейсмологии [4] размер очага землетрясения связан с выделяющейся энергией соотношением $A \approx 0,134 \cdot W^{1/3}$. Так как энергия горно-тектонического удара варьируется от 100 до 10^9 Дж, то размер очага варьируется от 0.622 до 134 м.

Для вычисления потенциала равномерно заряженного эллипсоида необходимо проинтегрировать выражение (1) по объему эллипсоида с полуосями $A > B > C$, повернутого под углом γ (см. рис. 1), с учетом (2), (3):

$$\Phi_4 = \frac{\rho_3 \text{div} \vec{j}}{2\pi} \int_V \aleph dV_p, \quad (4)$$

где $\text{div} \vec{j}$ – объемная плотность токов, А/м³.

Перейдем в (4) к безразмерным координатам по формулам: $s/A = s^*$. Тогда в (1) можно сделать замену вида $m \cdot R = M$, и тогда $dm = dM/A$, а в выражении (4) $dV_p = A^3 dV_p^*$. Далее при вычислении интегралов будем иметь дело только с безразмерными величинами, поэтому знак «звездочка» использовать не будем. Таким образом (4) будет иметь вид:

$$\Phi_4 = \frac{d_\varphi}{2\pi} \int_V \aleph dV_p, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{где } r &= [(xm - xp)^2 + (ym - yp)^2]^{1/2} = \\ &= [Am + (Ym - Yp)^2]^{1/2}, \end{aligned}$$

здесь

$$\begin{aligned} Am &= XX \cos^2 \gamma - XZ \sin(2\gamma) + ZZ \sin^2 \gamma, \\ XX &= (Xm - Xp)^2, \quad ZZ = (Zm - Zp)^2, \\ XZ &= (Xm - Xp) \cdot (Zm - Zp), \\ zm - zp &= (Xm - Xp) \sin \gamma + (Zm - Zp) \cos \gamma, \end{aligned}$$

xm, ym, zm, Xm, Ym, Zm и xp, yp, zp, Xp, Yp, Zp – координаты точек измерения и точек эллипсоида в старой и новой системе координат соответственно; $d_\varphi = \rho_3 A^2 \text{div} \vec{j}$ – размерный коэффициент.

Объемная плотность на разных стадиях фор-

мирования очаговой зоны горно-тектонического удара определяется по различным формулам. На начальной стадии, когда существенным вкладом в образование электрического поля являются перепады механических напряжений, плотность тока и размерный коэффициент определяются по формулам [2]

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{j} &= \frac{3 \cdot \Omega \cdot M}{2 \cdot q \cdot \rho_1 \cdot A \cdot C} \nabla \sigma_{cp}, \\ d_\varphi &= \frac{3 \cdot \Omega \cdot M \cdot \rho_3 \cdot A}{2 \cdot q \cdot \rho_1 \cdot C} \nabla \sigma_{cp} \end{aligned} \quad (6)$$

где A, C – длина полуосей эллипсоида вращения, м; $\Omega \sim 10^{-29}$, м^3 – дилатация кристаллической решетки; $q \sim e \approx 1,602 \cdot 10^{-19}$, Кл – заряд вакансии; ρ_1 – УЭС 1 слоя, Ом·м; $M = C + W^{-1} \times A^2 \arcsin(A^{-1} \cdot W)$, $W = (A^2 - C^2)^{1/2}$, $\nabla \sigma_{cp}$ – среднее напряжение в очаге, Па/м.

На стадии интенсивного микротрещинообразования объемная плотность токов и размерный коэффициент может быть найдены в соответствии с [5] по формулам:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{j} &= \frac{2\pi}{\rho_1 \varepsilon_0 \varepsilon_1} L Q v \tau_p, \\ d_\varphi &= \frac{2\pi A^2 \rho_3}{\rho_1 \varepsilon_0 \varepsilon_1} L Q v \tau_p \end{aligned} \quad (7)$$

где L – линейный размер образующихся микротрещин, м; c' – скорость микротрещинообразования, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$; τ_p – время релаксации зарядов в вершине трещины, с; Q – линейная плотность заряда на единицу длины фронта трещины, Кл·м $^{-1}$; $\varepsilon_0 \varepsilon_1$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость горных пород в слое 1, Ф·м $^{-1}$; ρ_1 – удельная электропроводность пород 1 слоя Ом·м.

На последней стадии формирования очага горного удара скорость микротрещинообразования может быть определена из кинетического уравнения [1]:

$$v = \frac{N^*}{\tau_0} \exp \left[\frac{\gamma \sigma_p - U_0}{kT} \right], \quad (8)$$

где τ_0 – период тепловых атомных колебаний, с.; γ – активационный объем, м 3 ; U_0 – энергия акти-

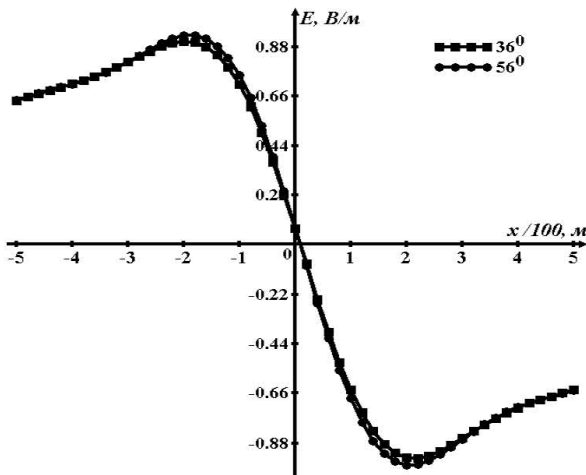


Рис. 2. $d=5,0$; $K_2=-0,99$; $\gamma=36^\circ, 56^\circ$, $\gamma=36^\circ, 56^\circ$

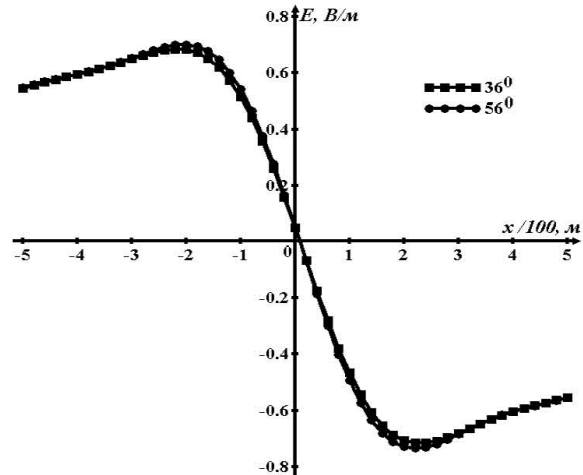


Рис. 3 $d=15,0$; $K_2=-0,99$; $\gamma=36^\circ, 56^\circ$

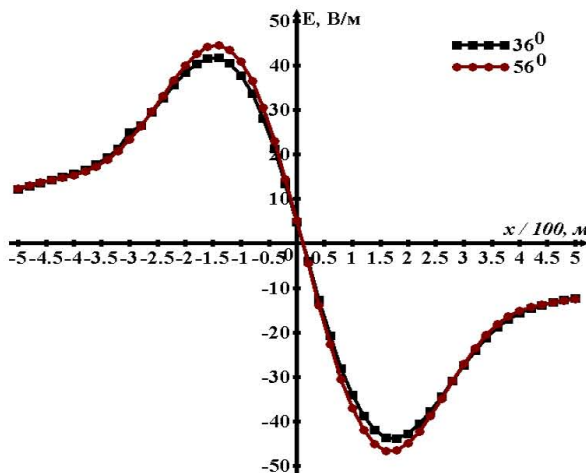


Рис. 4. $d=5,0$; $K_2=-0,7$, $\gamma=36^\circ, 56^\circ$

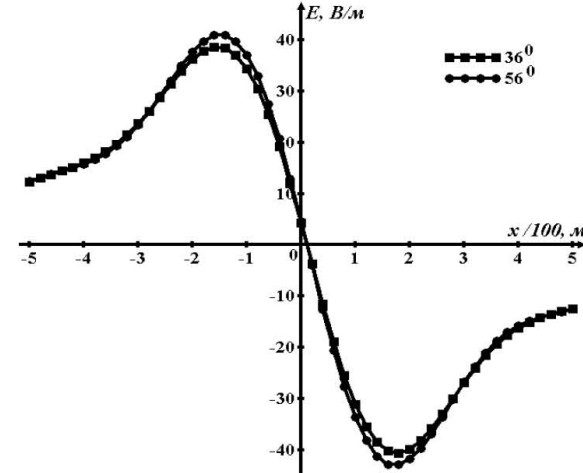


Рис. 5 $d=15,0$; $K_2=-0,7$, $\gamma=36^\circ, 56^\circ$

вационного разрушения, Дж; k – постоянная Больцмана, Дж/град; T – абсолютная температура пород, К⁰; σ_p – напряжение, снимаемое при разрушении, Па.

Число накопленных к моменту землетрясения микротрещин в единице объема может быть определено из концентрационного критерия разрушения [1]: $(N^*)^{-1/3} \cdot L^{-1} \approx 3$, откуда

$$N^* \approx 0,037L^{-3}.$$

Приведём оценки величины сомножителя при интеграле в (5) для следующих модельных значений

$$\begin{aligned} A=100,0; C=10,0 \text{ м}; K_I=0,8; L \approx 10^{-4} \text{ м}, \\ Q \approx 6 \cdot 10^{-11} \text{ Кл/м}, \tau_p \approx 10^{-5} \text{ с}, T = 293^0 \text{ К}, \\ \varepsilon_0 \varepsilon_1 \approx 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}, \sigma_p \approx 4,33 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2, \\ \gamma \approx 3,87 \cdot 10^{-27} \text{ м}^3, U_0 \approx 1,5 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}, \\ k \approx 1,3805 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}^0 \text{ К}. \end{aligned}$$

на первой стадии он равен

$$\begin{aligned} d_\varphi / 2\pi = 186,759 \text{ мВ}, \text{ если } K_2 = -0,7 \text{ и} \\ d_\varphi / 2\pi = 1,059 \text{ мВ}, \text{ если } K_2 = -0,998; \end{aligned}$$

а на второй стадии $d_\varphi / 2\pi = 822,705 \text{ В}$, если $K_2 = -0,7$ и $d_\varphi / 2\pi = 4,680 \text{ В}$, если $K_2 = -0,998$.

Для расчёта компонент вектора напряжённости можно использовать формулы численного дифференцирования (погрешность порядка малости $O(h^2)$)

$$E_x = \frac{-3 \cdot \Phi(x, y) + 4 \cdot \Phi(x + h, y) - \Phi(x + 2 \cdot h, y)}{2 \cdot h}, \quad (9)$$

Графики рассчитанной по формуле (9) с учётом (7) величины E_x для модельных значений: $A=100,0$; $B=50,0$; $C=10,0$; $h=50,0$ м; $\alpha=45^\circ$; $K_I=0,8$; $zm=170,0$ м приведены на рис. 2-5.

Анализ рис. 2 – 5 даёт следующие выводы:

1) Увеличение мощности угольного пласта приводит к уменьшению величины напряжённости поля, что связано с увеличением экранирующего эффекта;

2) Увеличение угла наклона очаговой зоны приводит к увеличению величины экстремумов напряжённости ЕЭП, что обусловлено уменьшением расстояния от очаговой зоны до угольного пласта.

3) Увеличение коэффициента отражения между угольным пластом и слоем увлажнённых пород приводит с одной стороны к увеличению модуля второй производной от потенциала ЕЭП (графики становятся более или менее пологими), а с другой стороны к существенному увеличению величины экстремумов напряжённости поля.

4) Увеличение величины снимаемого напряжения до $\sigma_p \approx 4,33 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ приведёт к увеличению размерного коэффициента на второй стадии в 2 – 2,5 раза и следовательно величина напряжённости электрического поля составит 100 – 150 В/м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов, В. В. Геодинамические процессы в земной коре и возмущения электромагнитного поля при образовании разломов [Текст] / В. В. Иванов, В. А. Хмяляйнен, Д. Ю. Сирота, Р. В. Бузук // ГИАБ. – 2008. – №2. – С. 122 – 132.
2. Сирота Д. Ю. Оценка влияния одного горизонтального угольного пласта на распределение электрического поля на земной поверхности / Сирота Д. Ю., Евдокимова А. И. // Вестник КузГТУ, – 2011. № 5. С. 8 11.
3. Теркот, Д. Геодинамика. Геологические приложения физики сплошных сред [Текст]: в 2 т./ Дональд Теркот, Геральд Шуберт. – М.: Мир, 1985, т2. –730 с.
4. Григорян, С.С. О механизме возникновения землетрясений и содержании эмпирических закономерностей сейсмологии / С. С. Григорян. – ДАН СССР [Текст]. – М.: 1988, т.299, в.5. –с. 1083 – 1087.
5. Иванов, В.В. Физические основы электромагнитных процессов при формировании очага разрушения в массиве горных пород [Текст]: дис. докт. техн. наук: 05.15.11: защищена 02.07.04; утв. 15.09.04 / Иванов В. В. – Кемерово, 1994. – 366 с..

□ Авторы статьи:

Сирота
Дмитрий Юрьевич,
канд.техн.наук, доцент каф.
теоретической и геотехнической
механики КузГТУ,
email: sirotadm@gmail.com

Иванов
Вадим Васильевич,
докт.техн.наук, профессор каф.
теоретической и геотехнической
механики КузГТУ,
email: vvi@kuzstu.ru