

УДК 658.382.2:553.277

В.Л. Шкуратник, В.М. Логачёва

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБВОДНЕННОСТИ
УГЛЕВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ПОДЗЕМНО-ПОЛЕВЫМ
ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Для решения прямой задачи горной геофизики разработана трехслойная геоэлектрическая модель углеводородного комплекса пород и получено распределение нормального и аномального полей от линейного питающего заземлителя с учетом проведения измерений как с поверхности выемочного столба, так и из оконтурочных шпектов.

Ключевые слова: горная геофизика, математического моделирования, надугольные породы, углеводородные комплексы пород.

Углепородный массив представляет собой сложную анизотропную, дискретную, слоистую, трещиноватую, обводненную среду, содержащую большое количество нарушений (сбросов, надвигов, разрывов и др.) и находящуюся в напряженном состоянии. Непрерывное развитие горных работ изменяет состояние и свойства массива и вносит соответствующие изменения в техногенные процессы, происходящие в нем, что приводит к формированию аномальных зон. Ведение горных работ вблизи или непосредственно в таких зонах приводит к нарушениям режима работы шахты и даже к авариям, поэтому заблаговременное прогнозирование состояния массива при подземной разработке угольных месторождений является актуальной задачей, при решении которой хорошо зарекомендовали себя электрометрические методы горной геофизики.

Закономерности распределения поля при электрометрических исследованиях на шахтах Подмосквовного бассейна изучались на физических

моделях в электролитических ваннах. Однако такое моделирование идеализирует реальную геологическую среду и затрудняет получение достоверных результатов из-за неточности создания критериев подобия. Поэтому, чтобы правильно истолковать получаемые результаты электрометрии, необходимо теоретически рассчитать поведение электрического поля в идеализированном многослойном разрезе «без» и «с» геологическими нарушениями в нем при линейном заземлении питающих электродов и исследованиях как с поверхности, так и из горной выработки.

Для проведения математического моделирования обоснована и разработана трехслойная горно-геоэлектрическая модель надугольных пород, основные геолого-геофизические параметры прорывоопасных зон и вмещающих пород которой представлены в табл. 1. Анализ каротажных данных геологических нарушений и обводненных зон в надугольных породах показал, что кажущееся электросопротивление ρ_k изменяется от 1500 Ом·м

Таблица 1

Геолого-геофизические параметры геоэлектрической модели надугольного комплекса пород

№ геологического слоя	Состав горных пород	Геологический индекс	Характеристика пород вмещающей среды						Характеристика пород аномального объекта							
			мощность слоя, м			кажущееся сопротивление, Ом·м			мощность, м			поперечные размеры, м			кажущееся сопротивление, Ом	
			min	max	optim	min	max	optim	min	max	optim	min	max	min	max	
1	Суглинок, глина, песок	Q_z M_z	10	40	25	20	100	60	10	40	25	10	100	30	10	200
2	Известняк	$C_1^{ок}$	5	70	30	200	800	500	5	70	50	10	100	50	30	1500
3	Песок, известняк, уголь, глина	C_1^{II} C_1^{bb}	15	40	20	50	120	80	5	40	30	10	100	30	10	500

(сухая трещиноватая зона) до 10 Ом·м (обводненная мульда).

Математическое моделирование выполнено для следующих размеров нарушения: 5, 10, 20, 40, 50, 70 м - по мощности (h_a); 10, 30, 50, 100 - по поперечному размеру (d_a). Максимальное приближение трехслойной модели (рис. 1) к натурным условиям позволило получить по разработанным алгоритмам и программам серию номограмм распределения нормального и аномального электрических полей. При этом модель рассматривалась как с кровли её первого горизонта, так и с подошвы третьего.

В связи с симметрией задачи нормальное электрическое поле не зависит от угла φ и потенциал U определяется по осям r и z следующим выражением:

$$U(r,z) = \frac{I \cdot \rho_0}{4\pi} \int_0^\infty J_0(m,r) \cdot V(m,z) dm, \quad (1)$$

где I - ток источника возбуждения, А; J_0 - функция Бесселя; m - переменная интегрирования; $V(m,z)$ - функция поля.

Решение задачи сводится к отысканию функции $V(m,z)$, которая, как и любое поле, есть сумма нормального и аномального полей:

$$V(m,z) = V_H(m,z) + V_a(m,z). \quad (2)$$

Для однородного полупространства определение потенциала электрического поля при заземлении питающей цепи линейным электродом, которому отождествляется обсадная колонна скважины, получено следующее выражение:

$$U(r) = \frac{I\rho}{2\pi r} \cdot \left(1 - \frac{a^2}{2r^2} + \frac{b^2}{2r^2} \right), \quad (3)$$

где a - длина электрода, м; b - радиус электрода, м.

Потенциал поля над трехслойной горизонтальной средой для точечного источника поля определяется следующим выражением:

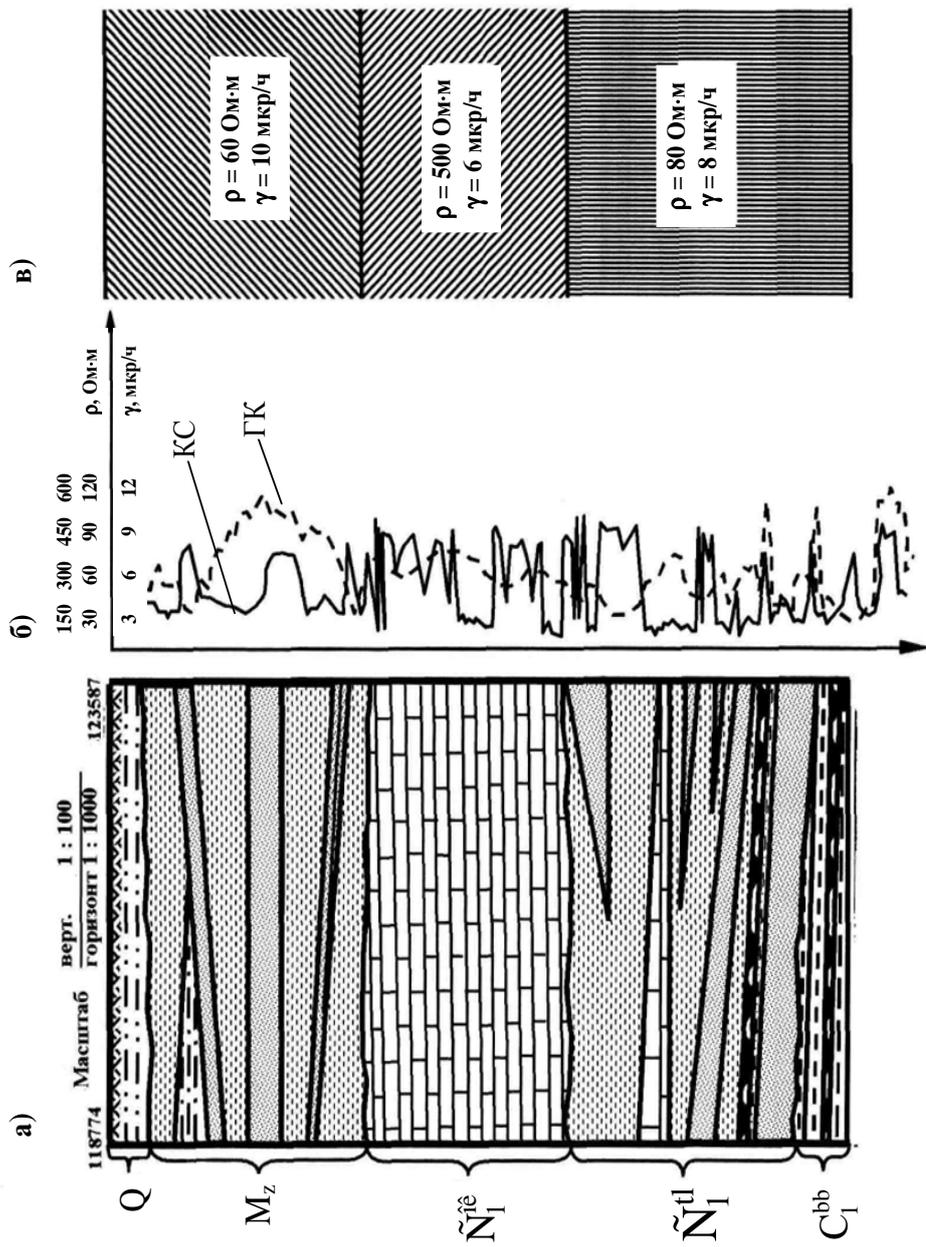


Рис. 1. Геолого-каротажные характеристики углевлмещающих пород для обоснования параметров геозлектрической модели: а) геологический разрез; б) каротажные диаграммы; в) геозлектрическая модель

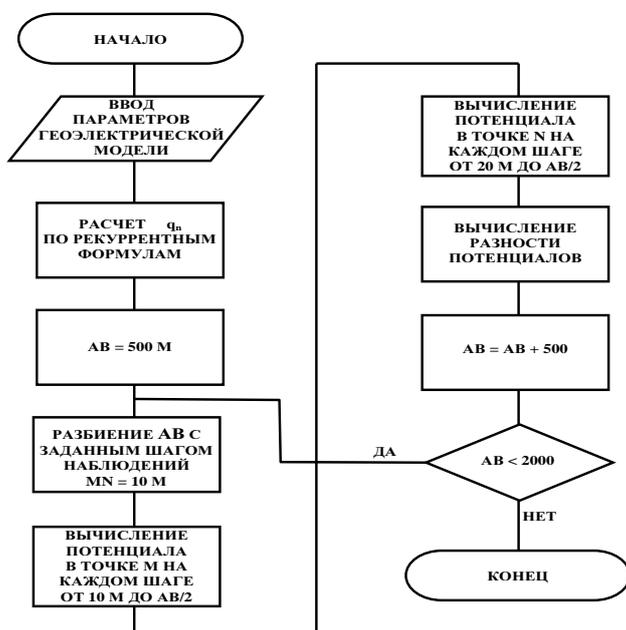


Рис. 2. Схема алгоритма расчета потенциала над трехслойной средой

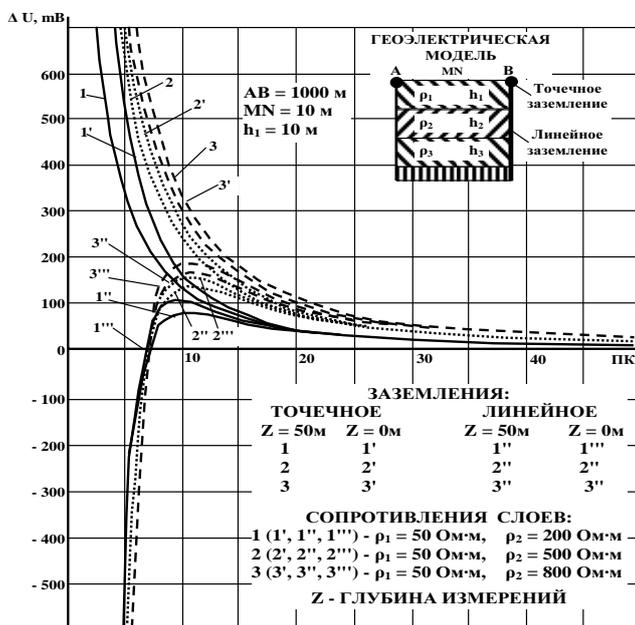


Рис. 3. Номограмма распределения потенциала нормального поля при точечном и линейном заземлении питающей линии

$$U(r) = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q_n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right], \quad (4)$$

где h – общая мера для мощностей первого h_1 и второго h_2 слоя, м; q_n – коэффициент эмиссии.

В результате математического решения и анализа выражений (1-4) потенциал электрического поля на поверхности трехслойной среды от линейного заземлителя может быть определен формулой:

$$U(r) = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q_n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right] \times \left\{ 1 - \frac{a^2}{2r^2} + \frac{b^2}{2r^2} \right\} \quad (5)$$

Выражение в квадратных скобках в физическом смысле отражает изменение расстояния от точки измерения до источника тока и учитывает "индивидуальность" геoeлектрического разреза. Выражение в фигурных скобках, является поправкой в значении потенциала за линейность питающего электрода. Сложность математических расчетов заключается в определении коэффициента эмиссии, который определяется для каждой геoeлектрической формулы по рекуррентной формуле:

$$q_{p_2+m} = K_{12} q_{p_2-p_1+m} + K_{23} q_m - K_{12} K_{23} q_{p_1+m}, \quad (6)$$

где K_{12} и K_{23} – коэффициенты отражения электрического тока из первой среды во вторую (K_{12}) и из второй среды в третью (K_{23})

Таблица 2

Количественные характеристики аномальных зон по данным математического моделирования

Тип геологического нарушения	Размеры нарушения, м		Ширина детерминированной аномалии d_a , м	Сопrotивление аномального объекта, ρ_a , Ом·м	$\rho_{\text{вм. ср.}}/\rho_a$		Интенсивность аномалии $\eta = \frac{\Delta U_a - \Delta U_{\text{н.ф.}}}{\Delta U_{\text{н.ф.}}} \cdot 100\%$
	горизонтальные $d_a = f(\Delta U_{\text{ест}})$	вертикальные $h_a = f(\eta)$			обводненное нарушение	необводненное нарушение	
Мульдообразное понижение	30-50	30-60	50	10-200	10-15	1	30-50 50-150
Эрозионный разрыв	50-100	20-40	70	20-500	10-27	0,4-1,5	50-85 150-700
Карстовое нарушение	20-60	50-70	30	30-15000	7-27	0,1-1,5	85-150 170-900
Трещиноватая зона	10-30	30-40	20	50-1000	4-16	0,1-0,5	85-150 150-1000

$$K_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}, \quad K_{23} = \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_3 + \rho_2} \quad (7)$$

индексы ρ_1, ρ_2 в (6) - численные коэффициенты, которые для каждой геоэлектрической модели равны:

$$\rho_1 = h_1/h, \quad \text{и} \quad \rho_2 = (h_1+h_2)/h, \quad (8)$$

m - положительное целое число, которое выбирается аналитическим путем.

При $m > 7$ существенного изменения в значение потенциала поля для геоэлектрического разреза не происходит, поэтому принимаем $m = 7$.

В случае двухслойного разреза потенциал электрического поля от линейного питающего заземлителя с учетом проведения измерений на поверхности выемочного столба равен:

$$U(r) = \frac{\Delta I_c}{2\pi} \rho_1 \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^m \frac{K_{12}^m}{\sqrt{r^2 + (2nh_1)^2}} \right] \left\{ 1 - \frac{a^2}{2r^2} + \frac{b^2}{2r^2} \right\}, \quad (9)$$

а с учетом проведения измерений из оконтуровочных штреков выемочного столба потенциал на любой глубине (z)

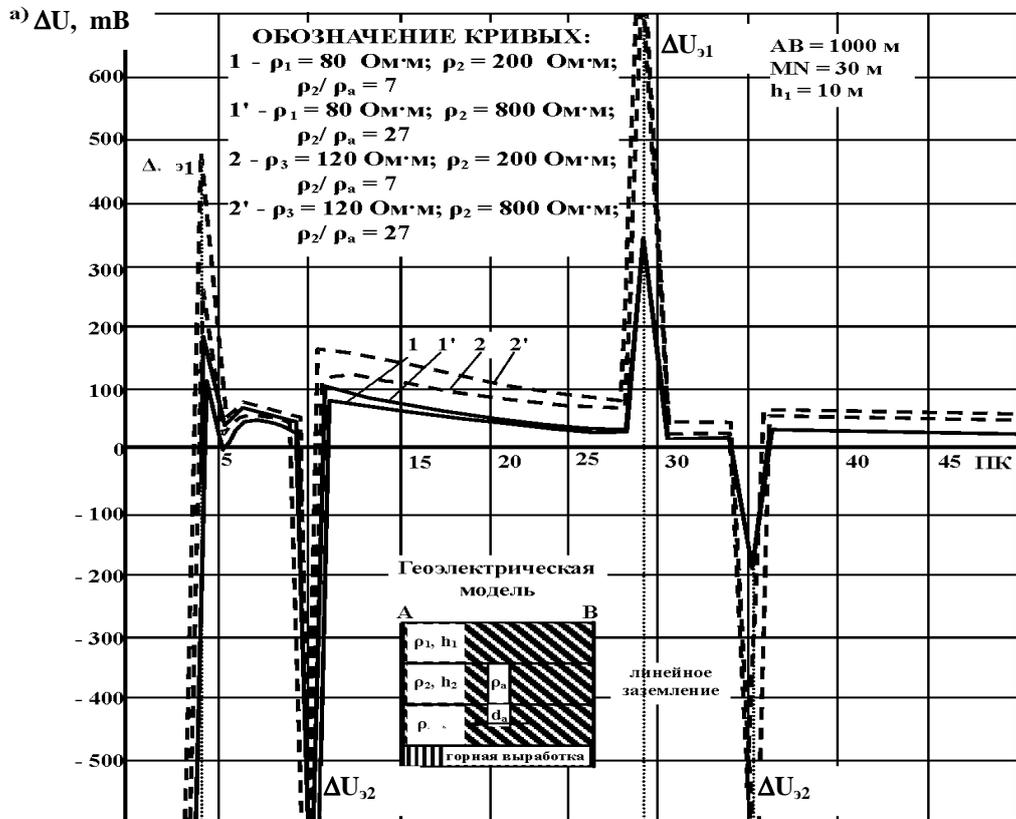
$$U(r, z) = \frac{\Delta I_c}{2\pi} \rho_1 \left[\frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}} + \sum_{i=1}^m \frac{K_{12}^m}{\sqrt{r^2 + (2nh_1 + z)^2}} + \sum_{i=1}^m \frac{K_{12}^m}{\sqrt{r^2 + (2nh_1 - z)^2}} \right] \times \left\{ 1 - \frac{a^2}{2(r^2 + z^2)} + \frac{b^2}{2(r^2 + z^2)} \right\}, \quad (10)$$

где ΔI_c - сила тока, стекающего с обсадной колонны; $m = 1-7$; z - глубина залегания угольного пласта (от 50 до 130 м).

По данным математического моделирования задач наземно- и подземно-скважинной электротриии получены следующие результаты:

по разработанным алгоритму (рис. 2) и программе решена прямая задача электротриии;

установлена возможность замены расчетов потенциала над трехслойной средой двумя двухслойными средами при рассмотрении модели сверху



б)

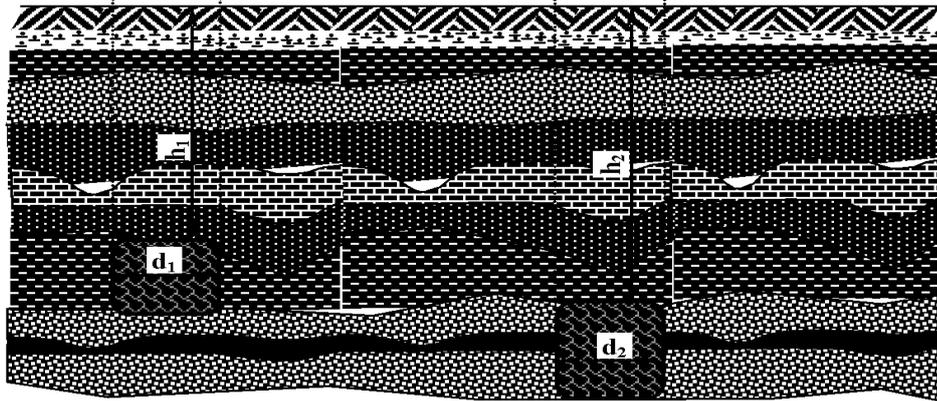


Рис. 4. Математическое моделирование аномальных объектов поля в случае карстовых нарушений в основной кровле и в угольном пласте: а) графики распределения аномального поля; б) горногеологическая модель пространственного положения нарушений

(со стороны первого-второго слоев) и снизу - (со стороны третьего-второго слоев) при сходимости нормального фона 30 мВ;

в зоне экстремальных значений (ПК-0-10) тренд нормального поля при точечном заземлении диаметрально противоположен тренду при линейном заземлении (рис. 3);

закономерности аномального поля при помещении аномального объекта на ПК-5-10 показали уверенную его регистрацию с интенсивностью 135-145 % на краевых участках (рис. 4);

при изменении параметров аномального объекта $\rho_{\text{вм.ср.}}/\rho_a = 2-10$ ($\rho_{\text{вм.ср.}} = \rho_1, \rho_2$ или ρ_3), $d_a = 10-100$ м, $h_a = 5-70$ м ($h_a = h_1, h_2$, или h_3) аномальный эффект над центром объекта изменяется на 5-50 %, над краями объекта в 2-10 раз, что обеспечивает

надежность получения количественных характеристик (d_a , h_a и ρ_a) при интерпретации графиков электрометрии, полученных как на дневной поверхности, так и в горной выработке (табл. 2).

По данным математического моделирования получена информация о характере и параметрах аномалий от различных прорывоопасных зон, т.е. решена прямая задача геофизики. По графикам электрометрии будет решена обратная задача геофизики - выявление геологического нарушения в надугольных породах: определение его глубины залегания и поперечных размеров. Это необходимо для выявления обводненных зон в углевмещающем комплексе пород и предотвращения прорывов воды и плывунов в горные выработки. **ПАЛБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Шкуратник Владимир Лазаревич – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой, Московский государственный горный университет, Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru
Логачева В.М. – доцент, кандидат технических наук, кафедра «Физика», Новомосковский институт РХТУ им. Д.И. Менделеева,



ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)			
БАБКИН Евгений Александрович	Совершенствование, исследование и диагностирование систем управления асинхронного частотно-регулируемого электропривода механизмов буровой установки	05.09.03	к.т.н.