

УДК 550.837:622.834

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДРАБОТАННОГО УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА

**Майборода А. А., Селяков Б. И., Туманов В. В.,
Савченко А. В., Ершова Г. А.**
(УкрНИИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

Наведені геоелектрична та математична моделі підробленого вуглепородного масиву стосовно до його зональності, сформованої під впливом макродеформаційних процесів.

Geoelectric and mathematical models of undermined coal-rock mass with regard to its zoning formed under the impact of macro deformation processes are given.

Успешное решение задач геофизического прогноза различных негативных явлений, характерных для регионов развития техногенно-геологической системы, надежность интерпретации геофизических данных – во многом зависят от достоверности обоснования физико-геологических моделей прогнозируемых процессов и явлений. Это моделирование и на его основе моделирование математическое всегда должно предшествовать проведению экспериментальных геофизических исследований. В каждом случае должны быть использованы предпосылки и закономерности, полученные по результатам физико-геологического анализа угленосных формаций угольного бассейна, прежде всего, в зонах влияния отработки угольных пластов.

В основу моделирования должны быть заложены определенные физические характеристики углей и вмещающих пород и их изменений в зонах деформирования подработанного массива горных пород. Для получения возможности реальной оценки

аномалиеобразующих факторов с учетом геологических особенностей угленосных толщ конкретных шахтных полей, их физических характеристик и значимости геологических нарушений, физико-геологическое моделирование для каждого из них необходимо осуществлять индивидуально, руководствуясь результатами обобщающих разработок, пример которых приведен в настоящей статье.

Нами показано геоэлектрическое моделирование для подработанных углепородных массивов Донбасса, в которых отработка угольных пластов завершена, мульда сдвижения сформирована, и активизация геодинамических процессов стабилизировалась.

В основу разработанной модели принята зональность, сформированная в подработанном горном массиве пород в результате макродеформационных процессов [1]. Преследовалась цель показать принцип построения универсальных геоэлектрических моделей на примере наиболее простого варианта подработанного массива и мульды сдвижения, характерных для угольных месторождений с пологим залеганием породных слоев без тектонических нарушений. Для участков с более сложным геологическим строением принцип моделирования аналогичен нижеописанному, но с более сложной дифференциацией зональности за счет наложения дополнительных факторов, например, трещиноватости зон влияния тектонических нарушений.

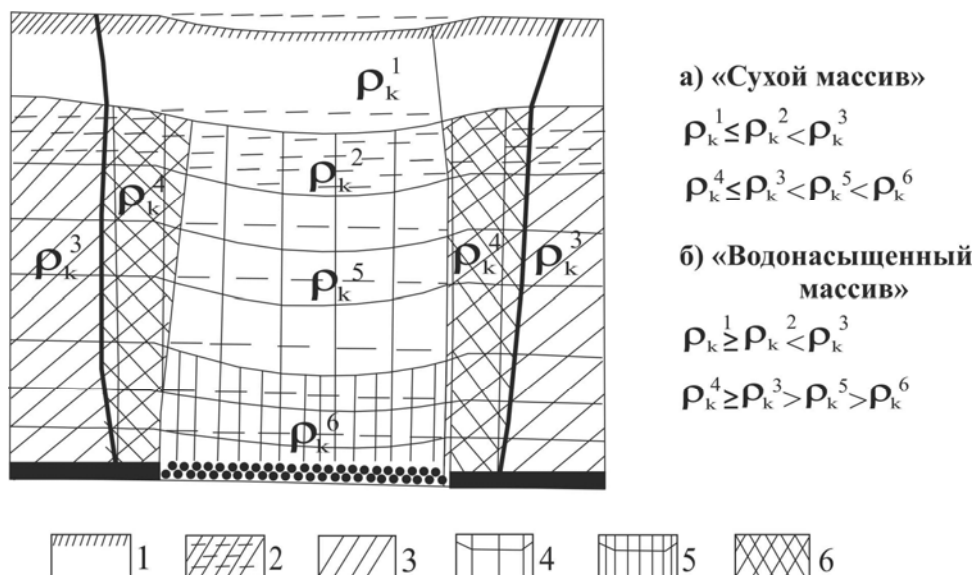
В любом случае геоэлектрическое моделирование изменения физических полей под воздействием техногенных процессов базируется на:

- физическом обосновании применения электроразведки;
- особенностях изменения геологической среды в результате угледобывающих работ;
- электрических характеристиках углепородных массивов и их изменений под влиянием геологических и техногенных процессов.

Известно, что для углевмещающих пород помимо закономерного увеличения значений удельного электрического сопротивления (ρ_k) с увеличением степени эпигенеза весьма существенное значение и влияние на параметры ρ_k имеют обводненность пород и их трещиноватость. Поэтому, при разработке гео-

электрических моделей внимание уделено, прежде всего, водонасыщенности углепородного массива (или её отсутствию) и зонам повышенной трещиноватости пород подработанных массивов.

На рисунке 1 приведена геоэлектрическая модель подработанного массива и мульды сдвижения горных пород без геологических нарушений. Модель несет двойную нагрузку, отображая соотношения значений ρ_k между зонами мульды сдвижения и сравнительно с не подработанным (фоновым) углепородным массивом в «сухом» и в водонасыщенном состоянии. При этом использован главный основополагающий тезис Руководства [2] «...в зонах «сухой» трещиноватости в 3-5 раз и более возрастают значения ρ_k пород, в обводненных участках эти значения уменьшаются в 1,5-3 раза по сравнению с фоновыми».



1 – покровные отложения (ρ_k^1); 2 – выветрелые отложения карбона (ρ_k^2); 3 – не деформированные отложения карбона (ρ_k^3); 4 – зона прогиба без разрыва сплошности пород (ρ_k^4); 5 – зона прогиба с развитием трещиноватости пород (ρ_k^5); 6 – зона опорного давления (ρ_k^6); ρ_k^{1-6} – удельное электрическое сопротивление

Рис. 1. Модель подработанного массива и мульды сдвижения горных пород без тектонических нарушений с условной индексацией зонального удельного электрического сопротивления (ρ_k , Ом·м)

Изменения удельного электрического сопротивления (ρ_k) массива горных пород без геологических нарушений следующие:

а) «Сухой» углепородный массив.

Покровные отложения и зона выветривания карбона характеризуются значениями ρ_k условно 30 Ом·м. Непосредственно в углепородном массиве самые низкие значения ρ_k характерны для не подработанной и, соответственно, не деформированной его части (ρ_k^3 – фоновые). Самые высокие значения ρ_k^6 приурочены к породам зоны влияния отработки угольного пласта и соответствующей техногенной трещиноватости пород. Эта зона характеризуется возрастанием значений ρ_k условно в 3,5 раза по сравнению с фоновыми (ρ_k^3).

Несколько меньшим возрастанием (ρ_k^5) по сравнению с фоновым (ρ_k^3), условно в 2,5 раза, характеризуется зона плавного прогиба слоев пород. Что касается зоны опорного давления, то, на наш взгляд, ρ_k^4 в результате уплотнения пород несколько ниже или, в случае стабилизации подработанного массива горных пород, приблизительно равно фоновым значениям ρ_k^3 .

Таким образом, для «сухого» подработанного массива в мульде сдвижения горных пород может наблюдаться такое зональное соотношение (см. рис. 1):

$$\rho_k^4 \leq \rho_k^3 < \rho_k^5 < \rho_k^6 \quad (1)$$

б) Водонасыщенный углепородный массив.

Покровные отложения и зона выветривания карбона характеризуются самым низким значением ρ_k (условно 10 Ом·м). В углепородном массиве, ориентируясь на работу [2], самые низкие значения (ρ_k^6) приурочиваются к зоне влияния отработки угольного пласта и техногенной трещиноватости, условно ниже фоновых (ρ_k^3) в 2,5 раза. А в зоне прогиба деформированных пород (ρ_k^5) понижение значений удельного электрического сопротивления условно принимается в 1,5 раза меньше фоновых значений (ρ_k^3). Самые высокие значения ρ_k принимаются для зоны опорного давления (ρ_k^4), которые или сравниваются с фоновыми ρ_k^3 или несколько выше их за счет уплотнения пород и снижения степени естественной трещиноватости. Таким образом, для водонасыщенного подработанного массива в мульде сдвижения горных

пород может наблюдаться такое зональное соотношение (см. рис. 1.):

$$\rho_k^4 \geq \rho_k^3 > \rho_k^5 > \rho_k^6. \quad (2)$$

Построенная модель, хотя и имеет обобщающий характер, является основой для выполнения второго этапа моделирования – разработки тестовых геоэлектрических моделей.

Основные принципы тестового геоэлектрического моделирования аналогичны разработкам моделей обобщающих. Так, их графические изображения, соотношение зональностей ρ_k в мульде сдвижения горных пород, причины и особенности изменения в этих зонах значений ρ_k – аналогичны вышеописанным.

В отличие от обобщающих моделей в тестовых приведены конкретные значения усредненного удельного электрического сопротивления пород для различных зон эпигенеза, рассчитанными по данным в работах [3, 4], исходя из гипотетического допущения равномерного распределения в массиве горных пород различных их литологических типов (табл. 1).

Таблица 1

Усредненные значения удельного электрического сопротивления терригенных пород угленосных формаций Донбасса в зависимости от эпигенетической зональности

Стадии эпигенеза		Марка угля	Усредненные значения удельного электрического сопротивления (ρ_k , Ом·м)			
			песчаник	алевролит	аргиллит	в среднем для массива (ρ_k^3)
Катагенез	ранний	Б	60	40	20	40
	средний	Д	70	50	30	50
		Г	150	100	50	100
	поздний	Ж	300	150	80	177
		К	50	200	100	261
		ОС	900	250	150	433
Метагенез	ранний	Т	1300	350	200	617
		А	>1500	650	300	820

Поскольку, как говорилось выше, графические изображения тестовых геоэлектрических моделей, как и соотношения зональных ρ_k для них, аналогичны обобщающим моделям, информация для них ниже приводится в табличной форме (табл. 2, 3).

Таблица 2

«Сухой» углепородный массив мульды сдвижения горных пород без геологических нарушений

Номер модели	Марка угля	Усредненные значения ρ_k , Ом·м				
		ρ_k^1, ρ_k^2	ρ_k^3	ρ_k^4	ρ_k^5	ρ_k^6
1	Б	30	40	40	100	140
2	Д	30	50	50	125	175
3	Г	30	100	100	250	350
4	Ж	30	177	177	443	620
5	К	30	261	261	650	914
6	ОС	30	433	433	1083	1516
7	Т	30	617	617	1543	2116
8	А	30	820	820	1680	1870
Отклонения (количество раз) от фоновых значений (ρ_k^3)			±0	условно ±0	+2,5	+3,5

Таблица 3

Обводненный углепородный массив мульды сдвижения горных пород без геологических нарушений

Номер модели	Марка угля	Усредненные значения ρ_k , Ом·м				
		ρ_k^1, ρ_k^2	ρ_k^3	ρ_k^4	ρ_k^5	ρ_k^6
9	Б	10	40	40	27	16
10	Д	10	50	50	33	20
11	Г	10	100	100	67	40
12	Ж	10	177	177	118	71
13	К	10	261	261	174	104
14	ОС	10	433	433	287	173
15	Т	10	617	617	411	247
16	А	10	820	820	547	328
Отклонения (количество раз) от фоновых значений (ρ_k^3)			±0	условно ±0	-1,5	-2,5

Таким образом, предлагаются тестовые геоэлектрические модели для математического моделирования изменения электри-

ческих полей в подработанном углепородном массиве для различных зон мульды сдвижения горных пород.

Чтобы решить прямую задачу ВЭЗ для предложенной модели подработанного массива, прежде всего, пренебрежем геометрией зон прогиба. Это допустимо, поскольку максимальные оседания в мульде сдвижения не превышают нескольких десятков сантиметров по сравнению с размерами самой мульды в сотни метров. Таким образом, будем аппроксимировать горный массив горизонтально слоистой моделью с включениями, расположенными в ее слоях. В каждом включении за удельное электрическое сопротивление примем усредненное сопротивление по этому включению ρ_k^j (рис. 2).

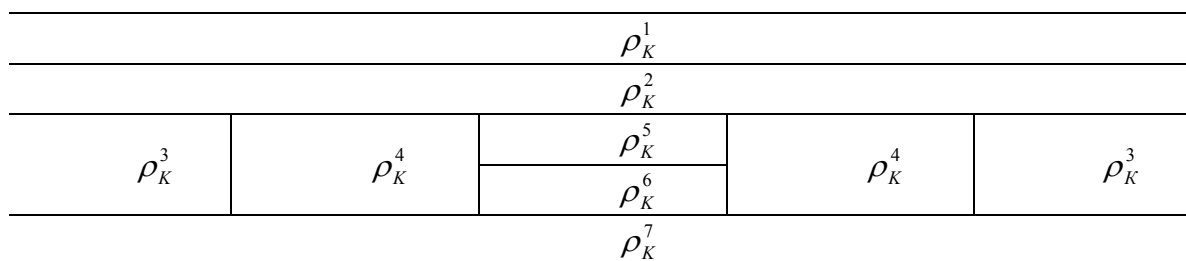


Рис. 2. Модель горизонтально слоистой среды с включениями (усл. обозн. см. рис. 1, ρ_k^7 - удельное электрическое сопротивление угольного пласта)

Решение поставленной задачи проведем методом поверхностных интегральных уравнений. Согласно [5] для электрического потенциала имеем:

$$U(M) = U^0(M) + \int_{\Gamma} G(P, M) I_s(P) ds_p, \quad (3)$$

где $I_s(P)$ – интенсивность вторичного поверхностного источника в точке p (численно равно величине электрического тока, стекающего с единичной площади поверхности включения);

$G(P, M)$ – функция Грина горизонтального разреза без включения (получена ранее [5]);

$U^0(M)$ – потенциал нормального электрического поля в слоистом разрезе;

Γ – сумма всех поверхностей включений.

Перейдем от модели, содержащей локальные неоднородности, к модели горизонтально слоистой среды, но с вторичными источниками, расположенными на поверхностях неоднородностей (рис. 3).

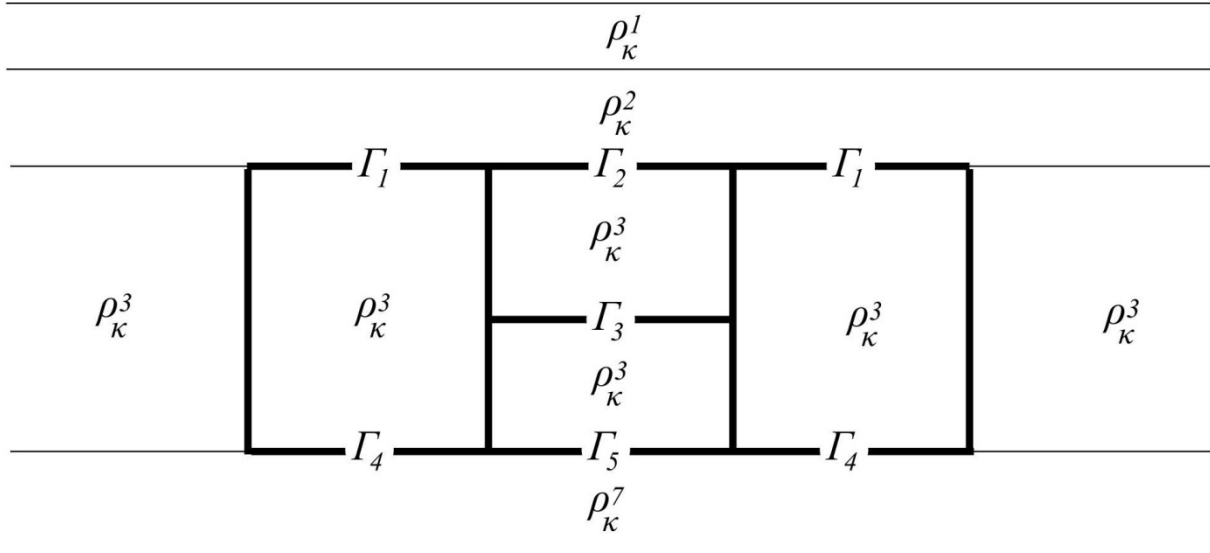


Рис. 3. Модель горизонтально слоистой среды с вторичными источниками тока, расположенными на границах Γ_i (усл. обозначения см. рис. 1 и рис. 2)

Согласно [5] для вторичных источников тока имеем обобщенное интегральное уравнение:

$$I_s(M) = K(M) \left[E_n^o(M) - \int \frac{\partial G(P,M)}{\partial n} I_s(P) ds_p \right], \quad (4)$$

где E_n^o – перпендикулярная к поверхности Γ компонента нормального поля;

n – нормаль к Γ в точке M .

Коэффициент K зависит от контрастности включения по отношению к вмещающей среде. Для рассматриваемых границ коэффициент $K(M)$ равен:

$$K(M) = \left(\frac{1}{\rho_k^2} + \frac{1}{\rho_k^3} \right) \left(\frac{\rho_k^4}{\rho_k^2} - \frac{\rho_k^3}{\rho_k^2} \right) \left(\frac{\rho_k^4}{\rho_k^2} + 1 \right)^{-1} \quad M \in \Gamma_1,$$

$$K(M) = \left(\frac{1}{\rho_k^2} + \frac{1}{\rho_k^3} \right) \left(\frac{\rho_k^5}{\rho_k^2} - \frac{\rho_k^3}{\rho_k^2} \right) \left(\frac{\rho_k^5}{\rho_k^2} + 1 \right)^{-1} \quad M \in \Gamma_2,$$

$$K(M) = \frac{2}{\rho_k^3} \left(\frac{\rho_k^6 - \rho_k^5}{\rho_k^6 + \rho_k^5} \right) \quad M \in \Gamma_3,$$

$$K(M) = \left(\frac{1}{\rho_k^3} + \frac{1}{\rho_k^7} \right) \left(\frac{\rho_k^7}{\rho_k^4} - \frac{\rho_k^7}{\rho_k^3} \right) \left(\frac{\rho_k^7}{\rho_k^4} + 1 \right)^{-1} \quad M \in \Gamma_4,$$

$$K(M) = \left(\frac{1}{\rho_k^3} + \frac{1}{\rho_k^7} \right) \left(\frac{\rho_k^7}{\rho_k^6} - \frac{\rho_k^7}{\rho_k^3} \right) \left(\frac{\rho_k^7}{\rho_k^6} + 1 \right)^{-1} \quad M \in \Gamma_5,$$

Для любого вертикального участка границы:

$$K(M) = \frac{2}{\rho_k^j} \left(\frac{\rho_k^j - \rho_k^{j+1}}{\rho_k^j + \rho_k^{j+1}} \right),$$

но вертикальные границы мы провели условно и на этих границах $\rho_k^j = \rho_k^{j+1}$ т.е. $K(M) = 0$.

Одним из способов решения уравнения (4) является разбиение границы Γ на элементарные участки, что позволяет свести решение уравнения к решению системы алгебраических линейных уравнений.

Для каждого элементарного участка границы необходимо задавать своё ρ_k^j и поскольку вертикальные границы в расчетах не участвуют, то такие границы можно провести для каждого элементарного участка что позволит, по нашему мнению, учесть анизотропию нарушенной области мульды сдвижения.

В целом геоэлектрическое моделирование совместно с моделированием сейсмогеологическим (разработанным при аналогичном подходе) является теоретической основой изучения изменений физических полей в различных зонах мульды сдвижения горных пород и представляет универсальные схемы разработки геолого-геофизических моделей для конкретных подработанных массивов шахтных полей Донбасса.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Иофис М. А., Шмелев А. И. Инженерная геомеханика при подземных разработках. — М. : Недра, 1985. — 248 с.
2. Методические указания по выявлению геофизическими методами мест возможных прорывов подземных вод на шахтах

Донбасса / Г. И. Колчин, А. А. Майборода, Ю. И. Николаев и др., // РД: Утв. ВТО «Союзуглегеология» 27.11.85. — Л. : ВНИМИ, 1987. — 35 с.

3. Гречухин В. В. Изучение угленосных формаций геофизическими методами. — М. : Недра, 1980. — 360 с.
4. Анциферов А. В., Довбнич М. М., Калашник А. А., Майборода А. А. и др. / Комплексирование геофизических методов / Под ред. К. Ф. Тяпкина. — Днепропетровск-Донецк : изд. «Вебер», 2008. — 335 с.
5. Электрическое зондирование геологической среды / Под редакцией Хмелевского В. К., Шевина В. А. Издательство МГУ, 1988. — 177 с.