

УДК 622.822.2:550.370

В.В. Иванов, Н.В. Трушникова

ЕСТЕСТВЕННОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ОЧАГОВ САМОНАГРЕВАНИЯ УГЛЕЙ

Поиск механизмов электромагнитных предвестников землетрясений и горных ударов привел к установлению нами универсального механизма электризации горных пород под действием механических напряжений [1,3,5]. При активизации сейсмических процессов, а также на стадиях, предшествующих регистрируемой сейсмичности, наблюдаются возмущения атмосферного электрического поля, фиксируемые иногда на расстояниях от десятков до тысяч километров от эпицентра [2]. Наблюдаются также аномальные возмущения импульсного типа и световые эффекты в атмосфере [2].

Аномалии квазистационарного электрического поля перед горными ударами в подземных условиях регистрировались нами в угольных пластах и рудных массивах (как правило, в породах с удельным электрическим сопротивлением не менее 10^2 , Ом·м) [3]. Вследствие малых времен жизни свободных зарядов в земной коре (10^{-7} , с.) для объяснения наблюдаемых аномалий необходимо было рассмотреть механизмы возникновения квазистационарных полей в глубинных слоях литосферы, приводящие к появлению в приземной атмосфере над эпицентром аномально высоких полей напряженностью $10^4 - 10^6$, В/м [2]. При изучении аномалий квазистационарного электрического поля в подземных условиях в угольных и рудных массивах установлено, что времена релаксации поля соответствуют временам релаксации механического состояния массива, причем в зоне опорного давления, вблизи контура выработок, потенциал поля линейным образом связан с первым инвариантом тензора геомеханических напряжений [3].

Коэффициент корреляции данной связи составляет 0,8—0,95. Поскольку в проводящих массивах горных пород свободные заряды длительное время могут существовать лишь за счет "сторонних" сил, для объяснения данного эффекта в [3] была выдвинута гипотеза возникновения аномалий за счет двойного электрического слоя поверхности контакта полезного ископаемого и вмещающих пород.

Если предположить, что в зоне возникновения градиентов геомеханических напряжений ЭДС источников двойного слоя зависит от давления, а также привлечь известную связь электрической проводимости пород с давлением, удастся удовлетворительно объяснить наблюдаемую связь потенциала поля с первым инвариантом тензора геомеханических напряжений.

Дальнейшие исследования аномалий квазистационарного поля на поверхности Земли,

обусловленных развитием фронта очистных работ на глубинах до 300 м, показали, что при вовлечении осадочных пород в процесс сдвижения, аномалии потенциала квазистационарного поля на поверхности достигают сотен милливольт, причем локальный экстремум потенциала впереди фронта горных работ перемещается в направлении отработки полезного ископаемого.

Полученные результаты позволили выдвинуть гипотезу об универсальной связи между аномалиями геотектонических напряжений в зоне подготовки крупных сейсмических событий и горных ударов с регистрируемыми аномалиями квазистационарного электрического поля [1]. Суть этой гипотезы состоит в том, что в зоне подготовки сейсмических событий при наличии градиентов геомеханических напряжений возникают аномалии квазистационарного поля, создающие в атмосфере над эпицентром достаточно сильное атмосферное электрическое поле. При этом глубина эпицентра не имеет большого влияния на величину возникающего поля, если предположить, что тектонический процесс охватывает значительные по протяженности объемы (участки) земной коры.

Одним из возможных механизмов, создающих аномалии указанного выше типа, на наш взгляд, является направленная диффузия точечных дефектов структуры в породообразующих минералах с ионным типом связи при наличии градиентов геомеханических напряжений на берегах возникающих микротрещин. Наиболее распространенными в земной коре представителями (до 60% всех минералов) породообразующих минералов с ионным типом связи являются калиевые и натриево-кальциевые полевые шпаты [5]. Наличие в них примесных ионов K^+ , Na^+ , Ca^{2+} существенно увеличивает концентрацию заряженных дефектов структуры - катионных вакансий [4]. В условиях термодинамического равновесия, при отсутствии градиентов концентрации дефектов их диффузия имеет хаотический характер, и электрический ток не возникает. При появлении градиентов геомеханического напряжения равновесие нарушается и возникает направленный поток катионных вакансий, создающих сторонний ток с плотностью [1]:

$$\vec{j} = \frac{\Omega_0 n_v^+ D_v^+ |Ze|}{3kT} \nabla \sigma_{kk}, \quad (1)$$

где n_v^+ — объемная концентрация катионных вакансий; D_v^+ — коэффициент самодиффузии ва-

кансий; Ω_0 – объем искажения решетки (дилатация) при наличии дефекта; Z - валентность катионной вакансии; e - заряд электрона; $\sigma_{kk} = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$ – первый инвариант тензора геомеханических напряжений; k - постоянная Больцмана; T - температура.

Полагая, что проводимость данного минерала при температурах до 500 К полностью определяется катионными вакансиями вследствие их высокой подвижности и, используя известное соотношение Эйнштейна

$$D_v^+ = \frac{\lambda k T}{n_v^+ (Ze)^2},$$

для напряженности \vec{E} и потенциала φ возникающего поля будем иметь

$$\vec{E} = -|\Omega_0| \nabla \sigma_{kk} / (3|Ze|), \quad (2)$$

$$\varphi = |\Omega_0| \sigma_{kk} / (3|Ze|). \quad (3)$$

Связь (3) является универсальной и подтверждена многочисленными измерениями в угольных и рудных массивах горных пород [3]. При этом коэффициент связи потенциала и средних напряжений из (3) приближенно равен 0.1 мВ/МПа, что подтверждается измерениями.

Таким образом, поскольку абсолютное значение первого инварианта тензора геомеханических напряжений есть функция глубины и существует градиент этой величины, вектор которого направлен по вертикали вверх, то под действием вертикального градиента плотности зарядов (заряженных дефектов), создается фоновое значение потенциала естественного электрического поля (ЕЭП) на земной поверхности [5]. Фоновые значения потенциала дают косвенную (полезную) информацию о состоянии недр.

Источником аномалий (отклонений от фоновых значений потенциала ЕЭП) являются очаги самонагрева в угольной среде, например, на разрезах, в забоях шахт, на отвалах и т.д. Одна из причин возникновения очага самонагрева – это окислительные процессы в угле, протекающие с выделением тепла в ограниченной замкнутой области [5-8]. С ростом температуры удельное электрическое сопротивление углей уменьшается и, наряду с баротоками, возникают термотоки, которые дают дополнительный вклад в потенциал ЕЭП [5-7]. Линейная зависимость между вариациями потенциала $\delta\varphi(\vec{x})$ и температуры $\delta T(\vec{x})$ имеет вид [6]:

$$\delta\varphi(\vec{x}) = B \delta T(\vec{x}). \quad (4)$$

Здесь

$$B = u/qT + (\Omega/q)\alpha E(1 + \sigma) / (9(1 - \sigma)(1 - 2\sigma)),$$

σ – коэффициент Пуассона; α – коэффициент

теплового расширения; E – модуль Юнга; q – заряд дефекта; Ω – дилатационный параметр; u – энергия активации перескока дефекта.

Как отмечено в [6], при «типичных» значениях параметров среды:

$$E \sim 10^{10}, \text{ Па}, \quad \alpha \sim 10^{-5}, \text{ К}^{-1}, \quad q \sim 10^{-19}, \text{ Кл}^{-1}, \\ \Omega \sim 10^{-29}, \text{ м}^3, \quad u \sim 0.1, \text{ эВ} \sim 10^{-20}, \text{ Дж},$$

при температурах $T \approx 300$ К, для постоянной B в линейной зависимости (4), имеем оценку

$$B = |\delta\varphi/\delta T| \approx 0,1 \div 1,0, \text{ мВ/град}.$$

С другой стороны, согласно экспериментальным исследованиям Г.В. Кроля [7], путем непосредственного измерения температуры в очагах самонагрева и потенциала ЕЭП для трех угольных пластов Кузбасса установлена следующая линейная зависимость:

$$\Delta\varphi \approx -B\Delta T + d. \quad (5)$$

Здесь $\Delta\varphi$ – приращение потенциала ЕЭП, mB , при росте температуры на ΔT° ; значения коэффициента B принадлежат интервалу $[1.5 \div 2.0]$, мВ/град, d – эмпирический коэффициент, значение которого определяется точкой заземления «нулевого» электрода.

Сравнивая величины B и $|\Delta\varphi/\Delta T| \approx 1,5 \div 2,0$ (мВ/град) в формулах (4), (5), можем сделать вывод, что оценка, полученная из теории возникновения термо- и баротоков, совпадает по порядку величин с результатами обработки непосредственных измерений в очагах самонагрева и ею можно воспользоваться при решении практических задач [8].

Отметим, что теоретические оценки (3)–(4) получены при нескольких предположениях, одним из которых является условие: источник создания электрического поля – «точный».

Линейная зависимость (5) определена на основе регрессионного анализа из данных натурального эксперимента с объемным источником самонагрева. Это подтверждено измерениями в контрольных скважинах (пласт «Мощный», участок 3 [7]) и решением обратной задачи определения поверхности и формы очага самонагрева [8]. По-видимому, этими причинами можно объяснить некоторую разницу в значениях коэффициента B , полученных из теории [5,6] и эксперимента [7].

Следует также подчеркнуть, что измеренный на дневной поверхности потенциал φ содержит три слагаемых: $\varphi_{фон}$ – фоновые значения потенциала; $\varphi_\sigma, \varphi_T$ – потенциалы, создаваемые баро- и термотоками, соответственно.

Для установления, какой из двух факторов: φ_σ или φ_T является основным ($\varphi_{фон}$ над очагом предполагается известным), целесообразно поступить следующим образом:

– по данным эксперимента, решением обрат-

ной задачи приближенно определить границу и форму очага, создающего аномалию ЕЭП;

– используя полученную форму очага (и его размеры), пробурить контрольную скважину и, применяя газоанализаторы, определить концентрации окиси углерода (СО) и углекислого газа (СО₂).

По этой схеме выполнен анализ данных эксперимента, проведенного на пласте «Мощный» (профиль 35) [7]. Из найденной формы очага [8], можно предположить, что эпицентр очага расположен между скважинами № 3 и № 4 на глубине от 0.5 до 1.5 м. Измерения объемных концентраций СО и СО₂ в устьях скважин № 3 и № 4 дают, соответственно, следующие значения [7]:

СО~0.2%, СО₂~3% и СО~0.2%, СО₂~2.2% ,

а замеры в скважине № 7 дают значения концентраций СО и СО₂: 0.05% и 0.1% . Таким образом, можно считать, что область, граница которой определена решением обратной задачи, является очагом самонагрева в угольном массиве. Это предположение также подтверждается измерениями температуры на стенках скважин №№ 1–7 [7].

Из вышеизложенного следует, что проблема локации очагов самонагрева углей с использованием полученных экспериментально аномалий ЕЭП – это сложная задача, для решения которой следует применять современную измерительную аппаратуру, математические методы обработки экспериментальных данных и численные алгоритмы решения обратных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тарасов, Б.Г.* Геотектонические процессы и аномалии квазистационарного электрического поля в земной коре / Б.Г. Тарасов, В.В. Дырдин, В.В.Иванов // Доклады АН СССР, 1990, т. 312, № 5, с. 1092 – 1095.
2. Электромагнитные предвестники землетрясений. – М.: Наука. 1982. – 87 с.
3. *Тарасов, Б.Г.* Геоэлектрический контроль состояния массивов / Б.Г. Тарасов, В.В. Дырдин, В.В. Иванов. – М.: Недра, 1983. – 215 с.
4. *Косевич, А.М.* Основы механики кристаллической решетки . . – М.: Наука. 1972. – 280 с.
5. Физический контроль массивов горных пород / Б.Г. Тарасов, В.В. Иванов, В.В.Дырдин, А.Н. Фокин. – М.: Недра, 1994. – 240 с.
6. *Алексеев, Д.В.* Механизм формирования квазистационарного электрического поля в массиве горных пород при наличии естественных и техногенных тепловых источников / Д.В. Алексеев, П.В. Егоров // ФТПРПИ. –1994. – № 5. – С. 3 – 7.
7. *Кроль, Г.В.* Разработка электрометрического способа контроля самонагрева и самовозгорания каменного угля на разрезах: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01: защищена 16.12.83: утв. 16.05.84 / Кроль Георгий Васильевич; ВостНИИ. – Кемерово, 1983. –195 с. – Библиогр.102 назв.
8. *Трушникова, Н.В.* Обратная задача локации очага самовозгорания угля по измерениям потенциала термоэлектрического поля на поверхности угольного разреза // Вестник . КузГТУ, 2010, № 3. – С. 3 – 6.

□ Авторы статьи:

Иванов
Вадим Васильевич
- докт. техн. наук, проф. каф.
теоретической и геотехнической
механики КузГТУ
E-mail: vvi@kuzstu.ru

Трушникова
Надежда Васильевна
- ст. преп. каф. математики КузГТУ
Тел 8-3842 - 39-63-36