

*Е.К. Бабец, канд.техн.наук, с.н.с, член-корреспондент АГНУ, директор,  
В.И. Чепурной, зав.лабораторией,  
С.И.Ляш, старший научный сотрудник,  
Ю.М.Мантула, старший научный сотрудник,  
Научно-исследовательский горнорудный институт ГВУЗ «КНУ»*

**ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ  
МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ  
ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ НЕВОЗВРАТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ  
ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОРОДНЫХ МАСС В РАЙОНАХ  
МАСШТАБНОГО ПРОИЗВОДСТВА ГОРНЫХ РАБОТ**

*Обоснована возможность применения магнитоэлектрического эффекта для аппаратурного обеспечения геофизической системы предупреждения и мониторинга невозвратной деформации дневной поверхности в районах масштабного производства горных работ.*

*Ключевые слова: геофизика, геостатическое давление, магнитное поле, магнитоэлектрический эффект, магнитострикция, пьезоэлектричество, напряженность магнитного поля.*

*Обґрунтована можливість застосування магнітоелектричного ефекту для апаратурного забезпечення геофізичної інформаційної системи попередження та моніторингу незворотної деформації поверхневих породних мас в районах масштабного виробництва гірничих робіт.*

*Ключові слова: геофізика, геостатичний тиск, магнітне поле, магнітоелектричний ефект, магнітострикція, п'єзоелектрика, напруженість магнітного поля.*

*Substantiated the possibility of application the magnetoelectric effect for hardware support of geophysical information system of prevention and monitoring of irrecoverable deformation of the earth's surface in areas of large-scale production of mining.*

*Keywords: geophysics, geostatic pressure, magnetic field, magnetoelectric effect, magnetostriction, piezoelectricity, magnetic field intensity.*

**Актуальность работы.** В промышленных регионах Украины, странах ближнего и дальнего зарубежья, где на протяжении многих десятилетий проводятся интенсивные горные работы, происходит существенное антропогенное нарушение природного геологического установившегося геостатического давления в породах как осадочного чехла, так и кристаллического фундамента.

Такое влияние на окружающую среду не может оставаться без последствий, в том числе и отрицательных, включая как ландшафтные, так и особенно социальные безвозвратные потери.

Как обычно, на такое развитие событий общество реагирует с большим запозданием, когда не реагировать становится совсем невозможным как для органов власти, так и существующих научно-технических структур.

Следует отметить, что первые, довольно осторожные попытки научного анализа процесса накопления деструктивной энергии безвозвратной деформации локальных участков потенциальных нарушений породного осадочного чехла и кристаллического фундамента породного массива, определенных участков и территорий Кривбасса, проводятся как НИГРИ ГВУЗ «КНУ», так и другими научно-техническими организациями Кривбасса.

Проблемы исследований, как обычно, состоят в финансовом обеспечении и в эмпирическом уровне знаний исследователей, хотя первое тесно связано со вторым.

Существующий эмпирический уровень знаний относительно генезиса и развития во времени очагов потенциального сдвижения осадочного чехла и кристаллического фундамента породного массива существенно тормозит как развитие методов наблюдений динамики вышеупомянутых объектов, так и, особенно, прогнозирование процессов потенциального сдвижения.

**Изложение основного материала и результаты.** Широко применяемый геофизический Метод исследований геодинамического состояния породного массива, именуемый, как метод регистрации параметров естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) во многом имеет эмпирическую основу, что ограничивает масштабы его использования, а сам метод имеет определенные недостатки.

Во-первых, как было отмечено, процесс образования локальных очагов излучения электромагнитной энергии в регионах с развитой добычей полезных ископаемых является исключительно антропогенным, следовательно, это ответ природы на принудительное вторжение в стабильное геостатическое давление и такое явление существует не везде и не всегда, а, как известно, магнитное поле Земли проявляется на земном шаре везде и всегда [1].

Во-вторых, что является весьма существенным, при использовании метода ЕИЭМПЗ, отдельные исследователи считают, что происходит регистрация не импульсов ЕИЭМПЗ, а отдельных нелинейных магнитных волн [2, 3, 4].

Следовательно, геофизическая квалификация метода ЕИЭМПЗ, исходя из позиций существующего физического явления, требует определенных уточнений.

В третьих. Любой естественный физический процесс со временем обязательно поддается математическому описанию, которое раскрывает его содержание и стимулирует соответствующее его использование.

Следует отметить, что метод ЕИЭМПЗ остается на эмпирическом уровне использования, и такое положение дел является следствием существующего толкования сути физического явления метода ЕИЭМПЗ.

В связи с изложенным необходимо выполнить анализ существующего естественного явления, а именно, динамики дискретного нелинейного магнитного поля в непрерывном статическом магнитном поле. Для этого есть все основания, так как основы генезиса физического явления, которое следует идентифицировать, лежат в следующем.

При повышенной внешней нагрузке определенных участков сплошной среды, а это также и осадочные, и кристаллические горные породы, формируется дисбаланс магнитного поля внутренней структуры горных пород.

В результате развития дисбаланса магнитного поля, в отдельных, наиболее уязвимых в дестабилизационном отношении участках горных пород, происходит их «возбуждение», а также образуются центры постоянного излучения нелинейных магнитных волн, в том числе и за счет энергии локального гравитационного поля, которое поддерживает и развивает повышенную внешнюю нагрузку центров динамики магнитного поля в условиях периодической промышленной динамичности, например, промышленной сейсмичности.

Динамика дискретной магнитной нелинейности происходит не в вакууме, а в непрерывном статическом магнитном поле, которое очевидно оказывает определенное сопротивление интрузии магнитной нелинейности, благодаря чему движение интрузивной нелинейности угасает к нулю, а движение интрузивной нелинейности имеет конкретную длину, которая зависит как от начальной мощности интрузивной нелинейности, так и от энергии внешнего статического магнитного поля, которое сдерживает движение интрузивной нелинейности к ее полному угасанию.

Кристаллические горные породы – вещества, обладающие одновременно и магнитным, и электрическим упорядочением. Взаимосвязь магнитных, электрических и упругих свойств таких пород приводит к тому, что в них возможны перекрестные эффекты, связывающие между собой магнитные и электрические, характеристики материала. При приложении к такой структуре внешнего электрического поля происходит изменение намагнитченности, и, наоборот, при приложении внешнего магнитного поля

происходит изменение поляризации. Этот эффект, называемый магнитоэлектрическим (МЭ), интересен тем, что позволяет создавать принципиально новые приборы твердотельной электроники. Величина МЭ-эффекта в монокристаллических породах довольно мала, что значительно сдерживает их практическое применение. В породах, представляющих собой механически связанные магнитострикционные и пьезоэлектрические компоненты, величина МЭ-эффекта значительно больше. Это позволяет создание приборов на основе МЭ-эффекта, например таких, как датчики магнитного поля, с чувствительностью, значительно превышающей чувствительность датчиков Холла. Механизм возникновения МЭ-эффекта обусловлен связью магнитострикции и пьезоэлектричества. В переменном магнитном поле вследствие магнитострикции возникают механические напряжения, которые передаются в пьезоэлектрическую фазу, где вследствие пьезоэффекта происходит изменение поляризации, что приводит к возникновению электрического напряжения. Поскольку пьезоэлектричество является линейной функцией напряженности электрического поля, а магнитострикция – нелинейной функцией намагниченности, в общем случае возникают как линейные, так и нелинейные МЭ-эффекты. Во многих работах исследовался линейный МЭ-эффект, заключающийся в возникновении электрического напряжения например, в конденсаторе, диэлектриком которого является магнитострикционно-пьезоэлектрический материал, при помещении его в постоянное (подмагничивающее) и переменное магнитные поля. Частотная зависимость эффекта имеет резонансный характер, и на частоте антирезонанса наблюдается пиковое увеличение МЭ-коэффициента. Величина эффекта зависит от постоянного магнитного поля, и на так называемой полевой зависимости имеется ярко выраженный максимум. В области слабых полей величина эффекта пропорциональна величине поля подмагничивания. Это связано с тем, что в области, далекой от насыщения, магнитострикция является квадратичной функцией намагниченности, поэтому при наличии поля подмагничивания величина МЭ-эффекта пропорциональна произведению напряженностей постоянного и переменного магнитного полей, т.е. наблюдается линейный по переменному магнитному полю МЭ-эффект. Однако наряду с линейным эффектом возникает и нелинейный МЭ-эффект, величина которого пропорциональна квадрату переменного магнитного поля. При больших полях подмагничивания его величина много меньше линейного, и его вкладом в результирующий сигнал можно пренебречь. Однако в области слабых полей его величина может быть соизмерима или больше величины линейного эффекта. Этот факт следует учитывать при разработке магнитоэлектрических датчиков магнитного поля, предназначенных для измерения слабых полей.

При квадратичном по напряженности переменного магнитного поля

эффекте частота механических колебаний, возникающих в магнитострикционной фазе, будет равна удвоенной частоте приложенного переменного магнитного поля. Передаваясь посредством механического взаимодействия в пьезоэлектрическую фазу, эти колебания приведут к изменению поляризации пьезоэлектрика, в результате чего на обкладках конденсатора возникнет электрическое напряжение с удвоенной частотой. При равенстве частоты переменного магнитного поля половине значения частоты антирезонанса будет происходить резонансное увеличение эффекта. В отличие от линейного эффекта этот резонанс будет наблюдаться при нулевом значении поля подмагничивания, и его величина будет квадратична по напряженности переменного магнитного поля.

В низкочастотной области спектра вследствие суперпозиции сигналов от линейного и нелинейного эффектов на временной зависимости сигнала возникает разность между амплитудами двух соседних максимумов, величина которой пропорциональна напряженности постоянного магнитного поля. Этот эффект можно использовать в качестве метода измерения постоянного магнитного поля в области полей, далеких от поля насыщения магнетика.

В качестве модели для теоретического описания МЭ- эффекта рассмотрим структуру в виде пластинки, состоящей из магнетика толщиной  ${}^m t$  и пьезоэлектрика толщиной  ${}^p t$  поляризованного в направлении, перпендикулярном плоскости пластинки (ось Z) [5, 6].

Будем считать, что направление постоянного магнитного поля и переменного магнитного поля с частотой  $\omega'$  совпадает с направлением поляризации. Уравнение движения для  $x$ -проекции вектора смещения среды  ${}^a u_x$  с учетом неоднородности колебаний в направлении, перпендикулярном границе раздела, имеет вид

$${}^a \rho \frac{\partial^2 {}^a u_x}{\partial t^2} = \frac{\partial {}^a T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial {}^a T_{xz}}{\partial z}, \quad (1)$$

где индекс  $a$  равен  $m$  для магнитострикционного и  $p$  для пьезоэлектрического слоя,  ${}^a \rho$  – плотность феррита или пьезоэлектрика,  ${}^a T_{ij}$  – тензор напряжений.

Полагая пластинку длинной и узкой, т.е. пренебрегая неоднородностями по ширине пластинки, с учетом того, что возникающие в магнитострикционной фазе колебания среды передаются в пьезоэлектрическую фазу, посредством сдвиговых деформаций, уравнения для тензора деформаций магнитострикционной  ${}^m S_{ij}$  и пьезоэлектрической  ${}^p S_{ij}$  фаз и  $z$ -компоненты вектора электрической индукции запишем в виде

$${}^m S_{xx} = \frac{1}{mY} {}^m T_{xx} + g_{xx,z} (H_z)^2, \quad (2)$$

$${}^m S_{xz} = \frac{1}{mG} {}^m T_{xz}, \quad (3)$$

$${}^p S_{xx} = \frac{1}{pY} {}^p T_{xx} + d_{z,xx} E_z, \quad (4)$$

$${}^p S_{xz} = \frac{1}{pG} {}^p T_{xz}, \quad (5)$$

$$D_z = \varepsilon_{zz} E_z + d_{z,xx} {}^p T_{xx}. \quad (6)$$

Здесь введены обозначения  ${}^m Y$ ,  ${}^m G$ ,  ${}^p Y$ ,  ${}^p G$  – модули Юнга и сдвига магнитоэлектрической и пьезоэлектрической фаз соответственно;  $g_{xx,z} = \delta\gamma_1(\delta(M_z)^2)\chi^2$  – магнитоэлектрический коэффициент;  $\gamma_1$  – магнитоэлектрическая деформация в направлении, перпендикулярном магнитному полю;  $\chi$  – магнитная восприимчивость;  $d_{z,xx}$  – пьезоэлектрический тензор;  $\varepsilon_{zz}$  – тензор диэлектрической проницаемости пьезоэлектрика;  $H_z = H_m \exp(i\omega t)$  – напряженность переменного магнитного поля с частотой  $\omega$ ;  $E_z$  –  $z$ -проекция вектора напряженности электрического поля в пьезоэлектрике.

Решение уравнения (1) представим в виде

$${}^\alpha u_x = {}^\alpha u(x, z) \exp(i\alpha x), \quad (7)$$

где  $\omega = 2\omega'$  – частота механических колебаний.

Решая уравнение движения для  $x$ -проекции вектора смещения среды и подставляя полученное выражение в уравнение (6) с использованием условия разомкнутой цепи для разности потенциалов, возникающей на обкладках конденсатора, получим выражение

$$U(t) = \frac{{}^p Y d_{xx,z} g_{xx,z}}{\varepsilon_{zz} \Delta \alpha} \frac{{}^m Y m_t}{{}^m Y m_t \frac{th({}^m \kappa)}{{}^m \kappa} + {}^p Y p_t \frac{tg({}^p \kappa)}{{}^p \kappa}}{\frac{tg(\kappa)}{\kappa} \frac{th({}^p \kappa)}{{}^p \kappa}} p_t (H_z(t))^2. \quad (8)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\Delta_\alpha = 1 - K_p^2 \left( 1 - \frac{{}^p Y {}^p t}{m Y {}^m t} \frac{th({}^m \kappa)}{{}^m \kappa} + {}^p Y \frac{tg({}^p \kappa)}{{}^p \kappa} t \right),$$

$$K_p^2 = \frac{{}^p Y (d_{xx,z})^2}{\varepsilon_{xx}} - \text{квадрат коэффициента электромеханической связи; } {}^m \kappa =$$

$${}^m \chi {}^m t \text{ и } {}^p \kappa = {}^p \chi {}^p t - \text{ безразмерные переменные; } {}^m \chi^2 = 2(1+\nu)(k^2 - \frac{\omega^2}{m V_L^2}),$$

$${}^p \chi^2 = -2(1+\nu)(k^2 - \frac{\omega^2}{p V_L^2}) - \text{ переменные, определяющие неоднородность}$$

смещения среды вдоль оси  $Z$ ;  ${}^m V_L = \sqrt{{}^m Y / {}^m \rho}$ ,  ${}^p V_L = \sqrt{{}^p Y / {}^p \rho}$  – скорости продольных звуковых волн;  $\nu$  – коэффициент Пуассона, который предполагается одинаковым для магнитострикционной и пьезоэлектрических фаз;  $\kappa = kL/2$  – безразмерный параметр;  $k$  – волновое число. Дисперсионное соотношение, связывающее волновое число с угловой частотой, определяется исходя из условия совместности решения системы уравнений (1)-(5) и, согласно [12], определяется выражением

$${}^m \chi {}^m Y t g({}^m \kappa) = {}^p \chi {}^p Y t h({}^p \kappa). \quad (9)$$

Уравнение (9) для тонких слоев значительно упрощается и переходит в выражение:

$$k = \sqrt{\frac{{}^m \rho {}^m t + {}^p \rho {}^p t}{m Y {}^m t + p Y {}^p t}} \omega. \quad (10)$$

Уравнение (8) описывает частотную зависимость МЭ-эффекта, которая определяется через зависимость волнового числа от частоты. Как следует из уравнения (8), на так называемых частотах антирезонанса, когда выполняется условие  $\Delta_\alpha = 0$ , наблюдается пиковое увеличение эффекта. Следует отметить, что частоты антирезонанса находятся вблизи частот резонанса, которые определяются условием  $\kappa = (\pi/2)(2n - 1)$  или  $L = (\lambda/2)(2n - 1)$ , где  $\lambda$  – длина волны акустических колебаний,  $n = 1, 2, \dots$  – целое число. Тогда с учетом (10) частота первого или основного резонанса будет наблюдаться вблизи частоты, определяемой условием

$$f_{res} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{{}^m Y^m t + {}^P Y^P t}{{}^m \rho^m t + {}^P \rho^P t}}. \quad (11)$$

Безусловно, указанная динамика (МЭ-эффекта) обязательно должна контролироваться результатами мониторинга.

Как и следует, рациональный подход к решению проблем своевременного предупреждения разрушений выявленных внешними наблюдениями неопределенных участков поверхностных породных массивов, в отличие от эмпирического, позволяет эффективно мониторить развитие во времени деструктивной энергии безвозвратной деформации конкретных участков потенциального сдвижения поверхностных породных массивов, что обеспечивает своевременное предупреждение времени их разрушения в районах масштабного производства горных работ как подземным, так и открытым способами.

#### **Выводы.**

1. В промышленных регионах Украины, странах ближнего и дальнего зарубежья, где на протяжении многих десятилетий проводятся интенсивные горные работы, происходит существенное антропогенное нарушение природного геологического установившегося геостатического давления в породах как осадочного чехла, так и кристаллического фундамента.

2. Антропогенное влияние на окружающую среду не может оставаться без последствий, в том числе и отрицательных, включая как ландшафтные, так и особенно социальные безвозвратные потери.

3. На антропогенное нарушение геологической среды общество реагирует с большим запозданием, когда не реагировать становится совсем невозможным как для органов власти, так и существующих научно-технических структур.

4. Вопросам научного анализа процесса накопления деструктивной энергии безвозвратной деформации локальных участков потенциальных нарушений породного осадочного чехла и кристаллического фундамента породного массива определенных участков и территорий Кривбасса уделяет внимание как НИГРИ ГВУЗ «КНУ», так и другие научно-технические организации Кривбасса.

5. Существующий эмпирический уровень знаний относительно генезиса и развития во времени очагов потенциального сдвижения осадочного чехла и кристаллического фундамента породного массива существенно тормозит как состояние развития геофизических методов наблюдений динамики состояния вышеупомянутых объектов, так и, особенно, прогнозирование процессов потенциального сдвижения.



6. Применяемый в настоящее время метод исследований геодинамического состояния породного массива, именуемый, как метод регистрации параметров естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) во многом имеет эмпирическую основу, что ограничивает масштабы его использования, а сам метод имеет целый ряд определенных недостатков.

7. НИИТ(USA) и НИГРИ ГВУЗ «КНУ» обоснована возможность применения магнитоэлектрического эффекта для аппаратурного обеспечения геофизической информационной системы предупреждения мониторинга невозвратной деформации дневной поверхности в районах масштабного производства горных работ как подземным, так и открытым способами.

#### *Список использованных источников*

1. Словник іншомовних слів. За редакцією члена-кореспондента АН УРСР О.С.Мельничука. – Головна редакція АН УССР. – Київ, 1974. – 776 с.
2. Барьехтар. Магнетизм, что это? – Киев: Наукова думка, 1981. – 208 с.
3. Сена Л.А. Единицы физических величин и их размерности. – М.: Наука, 1977. – 336 с.
4. Филиппов А.Т. Многоликий солитон. – М.: Наука, 1990. – 288 с.
5. Веневцев Ю.Н., Гагулин В.В., Любимов В.Н. Сегнетомагнетики. – М.: Наука, 1982. – 224 с.
6. Белов К.П. Магнитострикционные явления и их технические приложения. – М.: Наука, 1987. – 160 с.

Рукопись поступила 18.07.2015