

# КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

*M. Primin, I. Nedayvoda,  
A. Burchak, P. Sutkovij,  
Y. Minov*

## **UNCONTACT MEASUREMENTS AND ANALYSIS OF MAGNETIC SIGNALS OF COAL SAMPLES**

*Method of investigations of magnetic signals of coal samples is proposed. Results of measurements and data processing are described.*

*Key words: coal, magnetic signals.*

*Запропоновано метод дослідження магнітних сигналів вугільної речовини. Наведено результати вимірювань та обробки даних вимірювань.*

*Ключові слова: вугільна речовина, магнітні сигнали.*

*Предложен метод исследования магнитных сигналов угольного вещества. Приведены результаты измерений и обработки данных измерений.*

*Ключевые слова: угольное вещество, магнитные сигналы.*

© М.А. Примин, И.В. Недайвода,  
А.В. Бурчак, П.И. Сутковой,  
Ю.Д. Минов, 2017

УДК 682.32+537.8

М.А. ПРИМИН, И.В. НЕДАЙВОДА, А.В. БУРЧАК,  
П.И. СУТКОВОЙ, Ю.Д. МИНОВ

## **БЕСКОНТАКТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ ОБРАЗЦОВ УГОЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА**

**Введение.** Предварительные исследования свойств каменного угля однозначно демонстрируют наличие магнитного сигнала от высокомолекулярного углефицированного органического вещества и зависимость энергетических характеристик магнитных сигналов от состояния и состава образцов угля [1, 2]. Для регистрации величин магнитного поля используют бесконтактный способ измерения с помощью магнитометрических систем на основе Superconducting QUantum Interference Device (SQUID) [3].

Одним из методов, позволяющих получить дополнительную информацию, является оценка влияния воздействий различной физической природы на угольное вещество. Наиболее часто используются механические методы воздействия, например, давлением, а также воздействие электрическими и/или магнитными полями, изменениями теплового режима, например нагрев и т. д. Предполагается, что эти воздействия могут привести и к изменению пространственной структуры магнитного сигнала. Таким образом, бесконтактно регистрируя и анализируя магнитный сигнал образца можно получить качественные и количественные оценки о возможных трансформациях структуры образцов угольного вещества.

Цель данной работы – изучение возможности метода исследования магнитного поля образцов угольного вещества для анализа воздействий, влияющих на их свойства и структуру.

**Материалы и методы исследования.** Исследования проводили на образцах угольного вещества шахты «Юбилейная». Размер зерен порошка – 1,0–0,2 мм. Количество вещества контролировалось по объему (емкость 61,4 см<sup>3</sup>). Из порошкообразной пробы были изготовлены округлые образцы. Каждый из образцов сформирован под давлением 46 тонн. Затем у образцов были обрезаны краевые сектора до квадрата  $\approx 65 \times 65$  мм.

Образцы № 1 и № 2 угольного вещества представляли собой порошок, прессованный в холодном режиме при температуре  $-2^{\circ}\text{C}$  и более никаким воздействиям не подвергались. Форма образцов № 1 и № 2 в процессе измерений была частично разрушена. Образцы горячего прессования готовились в два этапа. Из порошкообразной пробы было изготовлено 10 округлых образцов. Состояние округлого образца сформированного под давлением 46 тонн принято нами за начальное. Образцы № 3 и № 4 находились именно в этом (начальном) состоянии. У восьми округлых образцов горячего прессования (№ 5–12) были обрезаны краевые сектора до квадрата  $\approx 65 \times 65$  мм. Затем в том же температурном режиме, образцы № 5 и № 6 были подвергнуты давлению с усилием 20 тонн, образцы № 7 и № 8 – давлению с усилием 34 тонн, а образцы № 9 и № 10 – давлению с усилием 46 тонн. Образцы № 11 и № 12 угольного вещества имели прямоугольную форму и никаким воздействиям не подвергались.

Регистрацию магнитных полей проводили в воздухе над образцами угольного вещества с помощью сверхчувствительной SQUID-магнитометрической системы (биосепптометр) в Институте кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины [4–5]. Принцип работы магнитометрической системы основывается на измерении магнитной восприимчивости магнитных носителей, находящихся внутри объекта. Для измерения магнитной восприимчивости антенна SQUID-магнитометра размещается в центре катушек Гельмгольца, создающих однородное переменное магнитное поле, которое может усиливать (намагничивать) собственное магнитное поле исследуемого образца. Перемещая объект исследования в центре катушек намагничивания, SQUID-магнитометр регистрирует магнитный сигнал, пространственное распределение которого (магнитная карта) является основой для локализации магнитных носителей и оценивания их концентрации. Система намагничивания состоит из двух взаимно перпендикулярных пар катушек на квадратных каркасах с взаимно перпендикулярными направлениями создаваемого магнитного поля ( $B_x, B_y$ ). Основой измерительного канала системы является осесимметричный SQUID-градиентометр второго порядка  $d^2B_z/dz^2$ . Специализированное математическое и программное обеспечение дает возможность по данным измерений магнитного поля восстановить картину распределения магнитных носителей в объеме исследуемого объекта в динамике.

Внешний вид SQUID-магнитометрической системы и образцов угольного вещества показан на рис. 1.



РИС. 1. а – магнитометрическая система для регистрации и исследования магнитных сигналов, б – образцы угольного вещества

**Результаты исследований и их обсуждение.** На первом этапе исследований были выполнены измерения магнитного поля в точках плоскости измерений (без объекта исследований) для регистрации внешних магнитных шумов в неэкранированном помещении, где установлена измерительная система. В табл. 1 приведены результаты измерений шумового сигнала (после цифровой обработки и усреднения), которые были приняты в качестве референтных и используются для сравнения с другими данными измерений.

ТАБЛИЦА 1

<p>Магнитные карты для 7 (из 50) моментов времени в режиме измерения без объекта исследований (магнитный шум в месте выполнения измерений)</p>	
<p>0.3437      0.2658</p>	<p>Пространственное распределение величин магнитного поля (один из вариантов отображения на экране компьютера) для одного момента времени. Красным цветом показано максимальное положительное значение сигнала, а синим – минимальное значение сигнала для данной магнитной карты</p>

Заметим, что для пространственного анализа магнитного поля были выбраны 7 моментов времени таким образом, чтобы последний момент времени соответствовал максимальному значению магнитного поля. Сине-серая палитра цветов на картах распределения поля в границах плоскости измерений соответст-

вует отрицательным значениям регистрируемого сигнала, а красно-желто-зеленая – положительным значениям. Это позволяет по распределению палитры цветов судить о величине сигналов магнитного поля.

На втором этапе исследований были последовательно выполнены измерения магнитного поля для каждого из исследуемых образцов угля. При этом использовались несколько алгоритмов измерений, каждый из которых предполагает последовательные измерения пространственного распределения величин параметров магнитного поля в 36 заданных точках плоскости измерений над объектом.

*Алгоритм измерений 1 (стандартная схема измерений).* Размер области наблюдений составлял 60 x 60 мм, объект исследований располагался в геометрическом центре этой области, стороны объекта ориентированы вдоль осей ОХ и ОУ лабораторной системы координат.

*Алгоритм измерений 1, а (исходная схема измерений).* В этом случае размер области наблюдений составлял 100 x 100 мм.

*Алгоритм измерений 1, б.* По отношению к алгоритму 1, а – стороны объекта ориентированы ортогонально осям ОХ и ОУ лабораторной системы координат. Другими словами, в этом варианте измерений объект располагался «ромбом».

*Алгоритм измерений 1, в.* В этом варианте измерений объект также располагался «ромбом», однако был перевернут на 180 градусов (вверх-вниз).

Схемы взаимного расположения в пространстве исследуемого объекта, области наблюдения и результаты измерений магнитного сигнала (магнитная карта для момента времени с максимальным значением энергетической характеристики) показаны на рис. 2 для образца угольного вещества № 5.

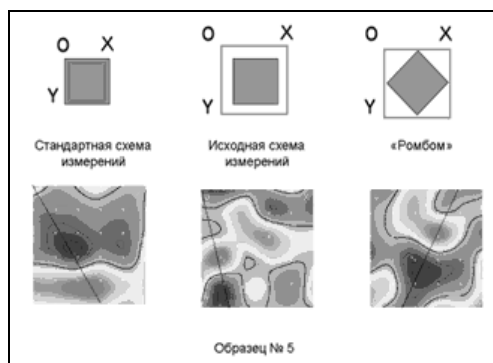


РИС. 2. Взаимное расположение в пространстве объекта исследований (образца угольного вещества) и области наблюдения

Выберем для анализа значения магнитного сигнала на отрезке прямой, проходящей через точки максимума/минимума магнитного сигнала. При этом значения магнитного сигнала нормированы таким образом, что максимальное (по всей области наблюдения) значение равно 10000. Местоположение исследуемо-

го отрезка также показано на рис. 2 для каждой схемы измерений. Распределения нормированного магнитного сигнала вдоль выделенных отрезков показаны в графическом виде на рис. 3.

Результаты измерений на рис. 3 соответствуют изменениям в схемах измерений:

- магнитные сигналы имеют одинаковую структуру (область отрицательных значений – область положительных значений);
- степень «концентрации» магнитного сигнала (размер области отрицательных и/или положительных значений) повышается при смене схемы измерений: наивысшая степень «концентрации» при стандартной схеме; при переходе к «исходной» схеме (увеличении размера области наблюдения) степень «концентрации» повышается; при переходе к схеме измерений 1, б, в степень «концентрации» превышает как уровень для «исходной», так и для «стандартной» схемы измерений. Заметим, что расстояние «измеритель – образец угольного вещества» во всех схемах измерений было одинаковым и не изменялось в процессе выполнения измерений.

Таким образом, мы получили качественные и количественные оценки изменения пространственной структуры магнитного сигнала при изменении соотношения размеров области наблюдения и объекта, а также при изменении взаимного расположения области наблюдения и объекта в пространстве. Полученные оценки в дальнейшем могут быть использованы для построения дополнительных алгоритмов исследований при сравнительном анализе образцов угольного вещества.

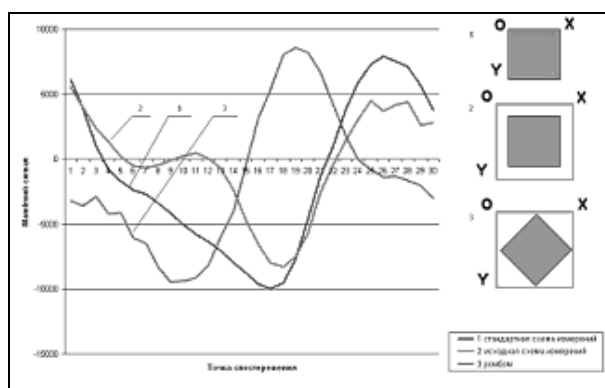


РИС. 3. Графическая зависимость магнитного сигнала образца № 5 угольного вещества для различных схем измерений

Часть результатов использования описанного алгоритма пространственного анализа магнитного сигнала на примере образца угольного вещества № 11 показаны на рис. 4. Распределения магнитных сигналов для схем измерений 1, б и 1, в показаны на рис. 4 как в виде магнитных карт, так и в виде графиков рас-

пределения амплитуды нормированного магнитного сигнала вдоль выбранных отрезков (местоположение отрезков также показано на магнитных картах).

Анализ результатов измерений магнитного сигнала для образца № 11 по алгоритмам измерений 1, б и 1, в (рис. 4) показывает, что в обоих случаях распределение магнитного сигнала (магнитная карта) имеет устойчивую дипольную структуру, размеры «полезной» области (где магнитный сигнал имеет отличные от магнитного шума значения) намного меньше размера области наблюдения. При развороте объекта в пространстве (от варианта 1, а к варианту 1, б) местоположение источника магнитного поля изменяется в полном соответствии с изменением местоположения образца в пространстве. Полученные результаты соответствуют «фокусному» источнику магнитного сигнала, который расположен на краю образца, на одной из его поверхностей. И вероятнее всего связан с наличием «загрязнения» образца (примесью).

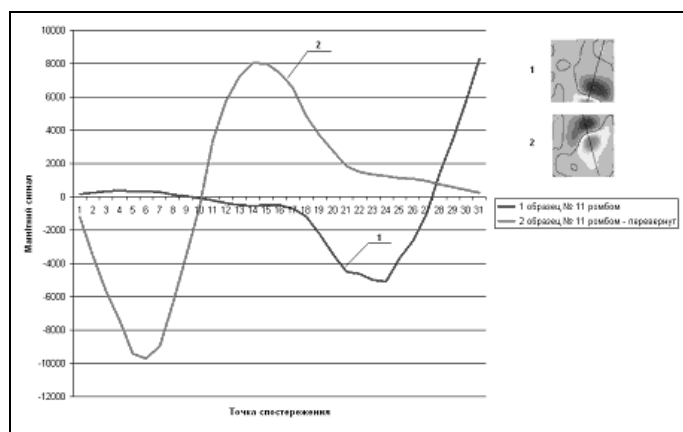


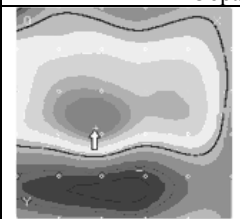
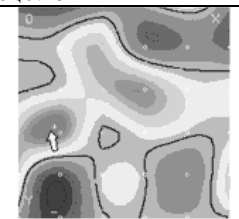
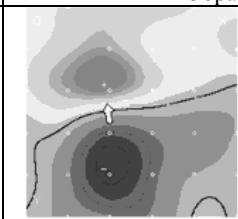
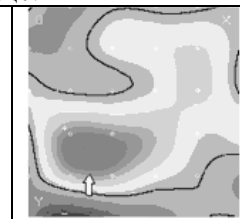
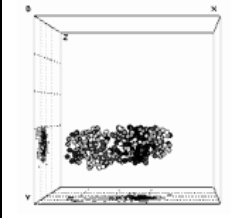
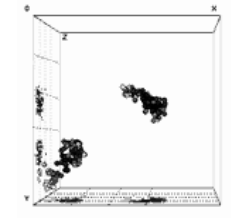
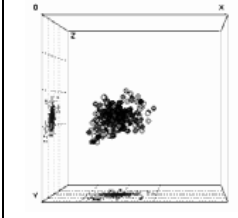
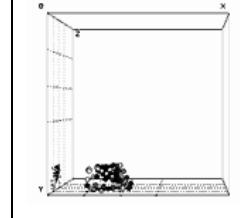
РИС. 4. Графическая зависимость магнитного сигнала образца № 11 угольного вещества для различных схем измерений

В табл. 2 приведены результаты измерений и анализа магнитного сигнала для образцов № 5 и № 11. Сравнение пространственного распределения магнитного поля (магнитных карт) образцов для стандартной схемы измерений (60 x 60 мм) показывает, что источник магнитного сигнала образца № 5 "неоднородно" распределен по объему объекта. На магнитной карте имеется несколько областей с положительными значениями магнитного сигнала, а области с отрицательными значениями сигнала «вытянуты» вдоль горизонтальной оси. Неоднородность распределения источника магнитного сигнала по объему объекта можно увидеть и на магнитной карте построенной после измерений в границах области измерений 100 x 100 мм («исходная» схема). В этом случае распределение магнитного сигнала фрагментировано и содержит несколько «зон», которые разнесены в границах области измерений и ориентированы в соответствии с направлением подмагничивающего поля (в вертикальном направлении). На следующем ша-

ге, для исследуемых данных магнитных измерений, выполнено решение обратной задачи магнитостатики [6]. Результаты решения обратной задачи показаны в табл. 2 в виде пространственной конфигурации источника сигнала из  $N$  магнитных диполей, распределенных в объеме объекта исследований. При этом можно видеть, что пространственная конфигурация источника магнитного сигнала в обоих случаях отличается от «фокусного» (сосредоточенного) источника и имеет форму «вытянутого» эллипсоида для области наблюдения 60 x 60 мм и несколько фрагментированных зон источников при регистрации сигнала в области 100 x 100 мм.

Результаты измерений магнитного сигнала образца № 11 угольного вещества также показаны в табл. 2 в виде карт магнитного поля и пространственной конфигурации источника сигнала в виде  $N$  магнитных диполей, распределенных в объеме объекта. Как результаты измерений, так и результаты решения обратной задачи позволяют сделать вывод, что источник магнитного сигнала в этом случае сосредоточен в малой области исследуемого объекта («фокусный»).

ТАБЛИЦА 2

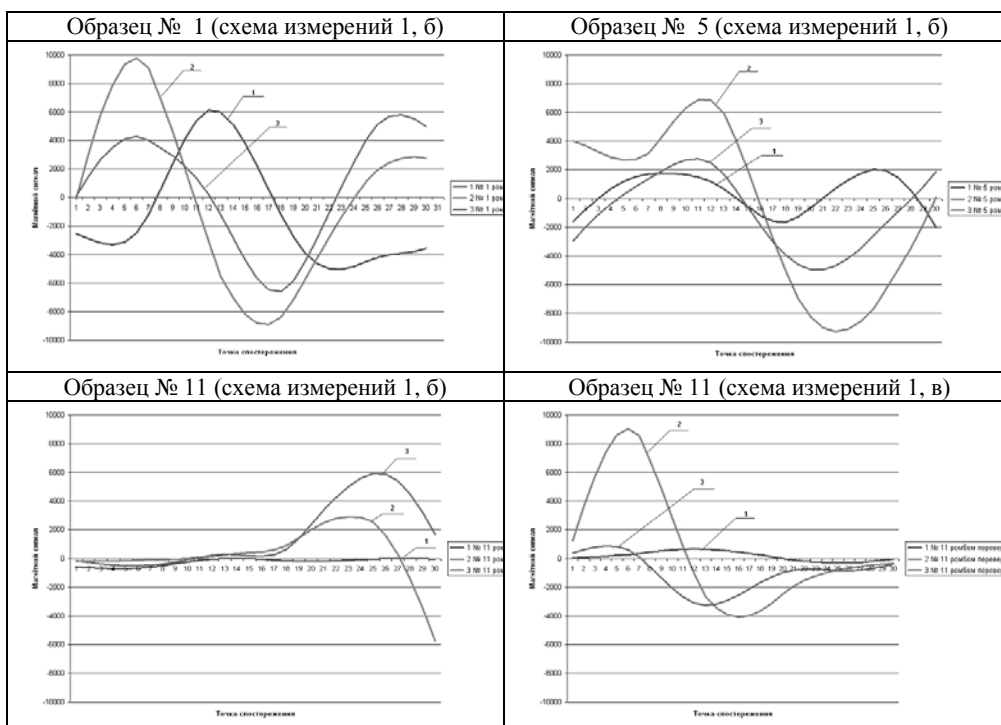
Образец № 5		Образец № 11	
			
			
Область измерений 60 x 60 мм	Область измерений 100 x 100 мм	Область измерений 60 x 60 мм	Область измерений 100 x 100 мм

На следующем шаге сравним магнитные сигналы образцов угольного вещества «холодного» и «горячего» прессования с образцами в начальном состоянии и рассмотрим далее результаты измерений магнитного сигнала для образцов № 1, 5 и 11. А именно результаты измерений, когда область измерений имеет размеры 100 x 100 мм, а объект ориентирован в пространстве по схеме измерений 1, б. При этом для исследования выберем один момент времени, где энергетическая характеристика магнитного сигнала имеет максимальное значение. В области наблюдения выделим три сечения (параллельные прямые):  $x = -30, 0, +30$  мм. Распределения магнитного сигнала вдоль трех выделенных сечений показаны в табл. 3. По отношению к центральному сечению  $x = 0$  магнитный сигнал в сече-

ниях, расположенных ближе к краям области наблюдения уменьшается. При этом затухание магнитного сигнала образца № 1 (холодное прессование) меньше чем для образцов № 5 и № 11. Затухание магнитного сигнала образца № 5 (горячее прессование) сильнее, чем для образца № 1 и значительно слабее образца № 11. Магнитный сигнал образца № 11 (исходное состояние) значительно ослабевает (затухает) к краям области наблюдения. Полученные результаты соответствуют результатам решения обратной задачи – источник магнитного сигнала существенно неоднородно распределен в объеме для образцов угольного вещества № 1 и № 5 (причем пространственная неоднородность выше для образца № 1 – холодное прессование). И – однородно распределен (имеет «фокусную» структуру) для образца № 11 (исходное состояние).

Для количественного анализа и сравнения результатов измерений для каждого из 50 моментов времени и для каждого измерения вычислялось значение энергетической характеристики магнитного поля (сумма квадратов значений выходного сигнала SQUID-градиентометра во всех 36 точках наблюдения). Результаты вычислений этой характеристики для исследованных образцов угля, по сравнению с магнитным шумом в месте выполнения измерений показаны на рис. 5 и отображают в графическом виде диапазон возможной вариации результатов измерений магнитного сигнала в зависимости от условий его регистрации.

ТАБЛИЦА 3





Поскольку магнитный сигнал образца № 11 вероятнее всего обусловлен наличием примеси (загрязнением), то для количественного анализа угольного вещества «по парам» указанные значения не используются. В результате получаем распределение максимального значения энергетической характеристики, которое показано на рис. 6. Здесь «0» – магнитный шум, «1, 2, 3, 4, 5, 6» – номер пары образцов угольного вещества.

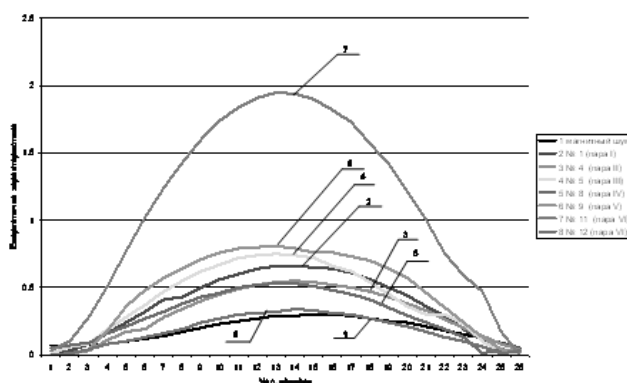


РИС. 5. Графическая зависимость параметра оценки магнитного сигнала для образцов угольного вещества (по одному исследованию для каждой пары образцов)

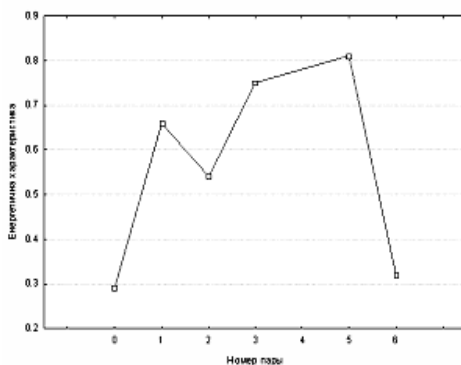


РИС. 6. Графическая зависимость параметра оценки магнитного сигнала для образцов угольного вещества

**Выводы.** 1. Использование бесконтактного магнитометрического метода для исследования магнитных свойств образцов угольного вещества позволяет зарегистрировать достаточно выраженные магнитные сигналы.

2. Полученные результаты измерений показали, что источник магнитного сигнала неоднородно распределен по объему объекта для образцов угольного

вещества «холодного» и «горячего» прессования, и имеет точечную ("фокусную") структуру для образца " в исходном состоянии" (образец № 11).

3. На данной серии образцов установлено существенное влияние величины механического давления при подготовке образцов угольного вещества на величину регистрируемого магнитного сигнала.

4. Метод бесконтактного магнитометрического исследования, как способ для исследования возможных изменений структуры и свойств угольного вещества требует дальнейшего экспериментального изучения.

1. Bulat A. F., Voytovich I.D., Burchak O.V., Nedayvoda I.V. and Primin M.A. Assessment of power terms of structural transformations of coal of associated to the selection of coal methane, Coal of Ukraine. 2012. Vol. 12. P. 7–10.
2. Bulat A.F., Voytovich I.D., Burchak O.V., Nedayvoda I.V. and Primin M.A. Research of the magnetic susceptibility of coal matter as the index of the energy state of coal. 2013. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine. Vol. 6. P. 99–104.
3. Fisher R. Non-invasive assessment of tissue iron overloaded. Hematology Am Soc Hematol Educ Program. R. Fisher, P.R. Hartz (eds.). 2009. P. 215–221.
4. Voitovych I.D., Primin M.A., Sosnytsky V.N. Application of SQUIDs for registration of biomagnetic signals - Low Temperature Physics. 2012. V. 38, N 4. P. 311–320.
5. Войтович И.Д., Примин М.А., Недайвода И.В., Минов Ю.Д., Орел В.Э., Лубянова И.П., Щепотин И.Б. Регистрация и анализ слабых магнитных полей, созданных в воздухе физическими и биологическими объектами с наночастицами железа и других материалов. *УсуМ*. 2012. № 1. С. 66–76.
6. Primin M., Nedayvoda I. Inverse problem solution algorithms in magnetocardiography : new analytical approach and some results. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. 2009. Vol. 29, N 2. P.65–81.

Получено 26.10.2017