

# КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

*M. Primin, I. Nedayvoda,  
S. Lugovskij*

## **UNCONTACT INVESTIGATIONS AND ANALYSIS OF MAGNETIC SIGNALS AT INTRODUCTION OF LEAD NANOPARTICLES AT THE SKIN OF SMALL ANIMALS**

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

*Key words: small animal, magnetic  
signal.*

*Запропоновано метод дослідження  
магнітних сигналів дрібних  
тварин. Наведено результати  
вимірювань та обробки даних  
вимірювань.*

*Ключові слова: дрібні тварини,  
магнітні сигнали.*

*Предложен метод исследования  
магнитных сигналов мелких жи-  
вотных. Приведены результаты  
измерений и обработки данных  
измерений.*

*Ключевые слова: мелкие живот-  
ные, магнитные сигналы.*

© М.А. Примин, И.В. Недайвода,  
С.П. Луговской, 2018

УДК 682.32+537.8

М.А. ПРИМИН, И.В. НЕДАЙВОДА, С.П. ЛУГОВСКОЙ

## **БЕСКОНТАКТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ВВЕДЕНИИ НАНОЧАСТИЦ СВИНЦА НА КОЖУ МЕЛКИХ ЖИВОТНЫХ**

**Введение.** Предварительные исследования демонстрируют возможность влияния свинца, который попадает в живой организм, на обмен железа, присутствующего в его органах и тканях [1]. Это в свою очередь сопровождается накоплением избыточных количеств железа в различных органах и тканях, и в том числе в печени. Накопление железа способно изменять магнитные характеристики органа. Для регистрации величин магнитного поля используют бесконтактный способ измерения с помощью магнитометрических систем на основе SQUID (Superconducting QUantum Interference Device) [2, 3].

Один из методов, позволяющий получить дополнительную информацию, является оценка влияния воздействий наночастиц соединений свинца. Наночастицы способны приобретать свойства, обеспечивающие более легкое проникновение этих соединений через неповрежденную кожу. При этом степень и интенсивность проникновения может определяться размером наночастиц.

Цель данной работы – изучение динамических изменений магнитных сигналов печени мелких животных (крыс) в результате хронического воздействия на их неповрежденную кожу наночастиц свинца (PbS – сульфида свинца).

**Материалы и методы исследования.** Исследования проводили на половозрелых крысах линии Вистар массой 180 – 200 г, кото-

рых содержали в стандартных условиях вивария в соответствии с рекомендациями [4] на стандартном пищевом рационе и свободным доступом к питьевой воде. На кожу животных пять дней в неделю на четыре часа наносились наночастицы PbS сульфида свинца. Были проведены несколько серий экспериментов с различной длительностью воздействия – один, два и три месяца. Кроме того были также проведены исследования воздействия (в течение месяца) на кожу ацетата свинца. Для каждой крысы проводили бесконтактное измерение магнитного поля над проекцией печени с последующей регистрацией и проведением анализа величин этих магнитных полей с помощью созданной магнитометрической системы на подвижной платформе. После проведения всех исследований предварительно наркотизированных животных сначала декапитировали, а после забирали печень для проведения морфологических исследований. Все манипуляции с животными проводили с соблюдением основных положений Европейской конвенции о защите позвоночных животных, которых используют для исследований и других научных целей [5] и Закона Украины «Про захист тварин від жорстокого поводження».

Регистрацию магнитных полей проводили в воздухе над печенью каждой из крыс контрольной и экспериментальной групп с помощью сверхчувствительной SQUID -магнитометрической системы (биосептометр) в Институте кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины [2, 3]. Принцип работы магнитометрической системы основывается на измерении магнитной восприимчивости магнитных носителей, находящихся внутри объекта (в нашем случае – в печени крысы). Для измерения магнитной восприимчивости антенна SQUID -магнитометра размещается в центре катушек Гельмгольца, создающих однородное переменное магнитное поле, которое может усиливать (намагничивать) собственное магнитное поле органа объекта или 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 органе исследуемого объекта в динамике.

Внешний вид SQUID -магнитометрической системы и ее структура показаны на рис. 1.

Магнитометрические исследования включают две последовательные стадии: 1 – ввод сигналов, сохранение результатов измерений в базе данных и их цифровая обработка; 2 – выделение интервала времени для исследования и пространственно-временного анализа магнитного сигнала и его источников. Основной задачей первого этапа исследований магнитного поля мелких животных

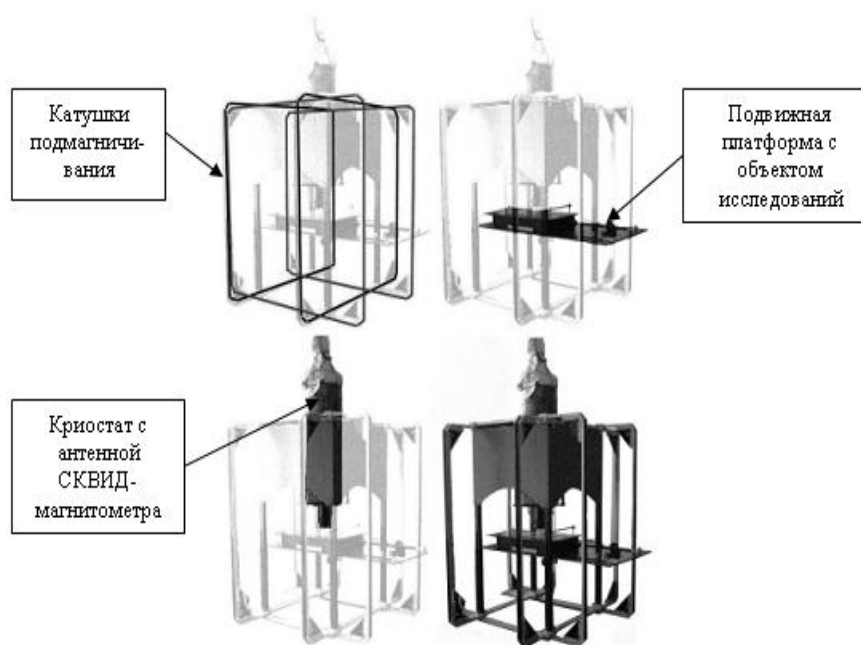
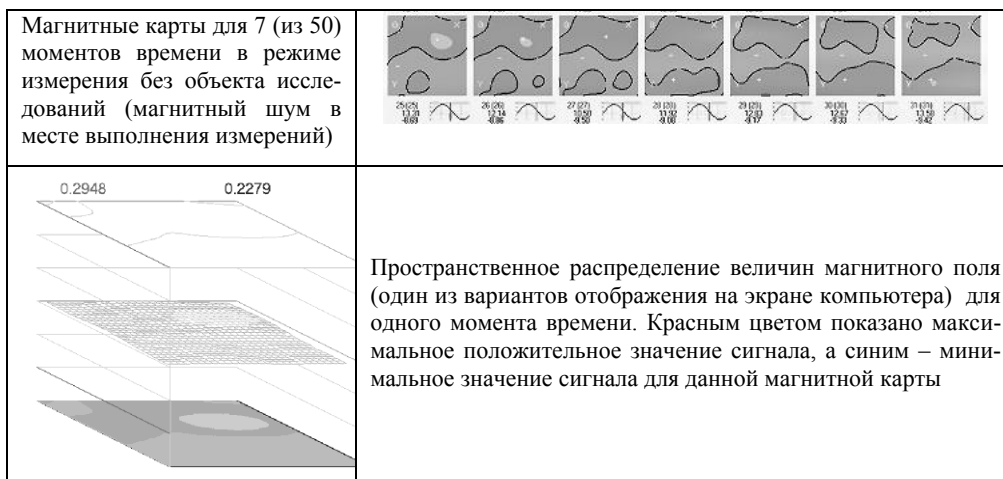


РИС. 1. Магнитометрическая система для регистрации и исследования магнитных сигналов

(МЖ; крыс, в нашем случае) является непосредственно ввод и сохранение результатов измерений параметров магнитного поля в 36 узлах прямоугольной решетки в плоскости измерений над печенью крыс. Шаг решетки составляет 12 мм по обеим направлениям. А также выделение и очистка сигналов от помех. При этом пакет начальной обработки магнитных сигналов включает в себя три логически разделяемых программных блока: блок ввода данных из измерительной системы в компьютер; база данных магнитометрических исследований; цифровая обработка сигналов. На втором этапе исследований для интерпретации данных такого рода необходимо решить, так называемую, обратную задачу – получить и исследовать распределение источников сигнала по измеренному распределению магнитного поля [6]. Принципиальная схема алгоритма измерений и описание каждого этапа регистрации и обработки данных приведены в [2].

**Результаты исследований и их обсуждение.** На первом этапе исследований 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

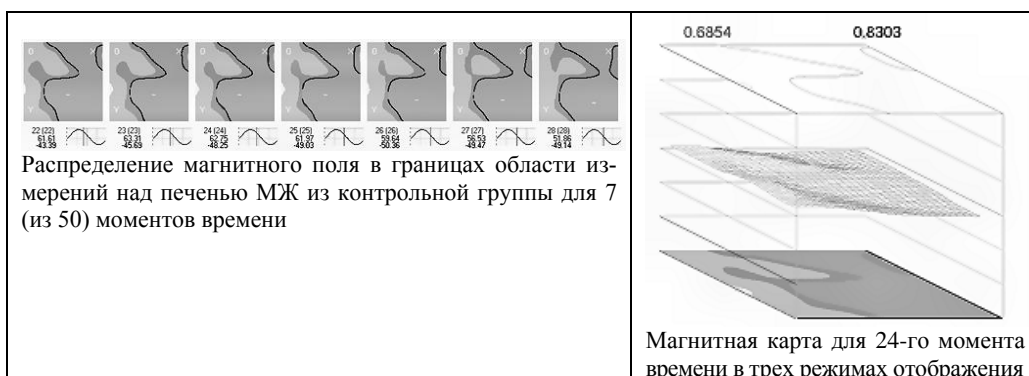


Заметим, что для пространственного анализа магнитного поля выбраны 7 моментов времени таким образом, чтобы последний момент времени соответствовал максимальному значению магнитного поля. Сине-серая палитра цветов на картах распределения поля в границах плоскости измерений соответствует отрицательным 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 последовательно выполнены измерения магнитного поля над печенью крыс в заданных точках плоскости измерений по описанному алгоритму для животных контрольной группы.

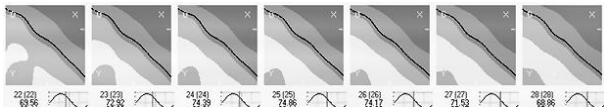
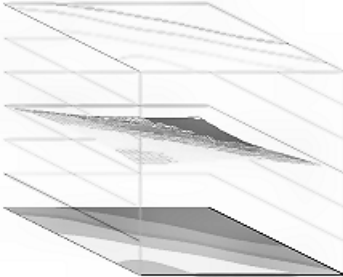

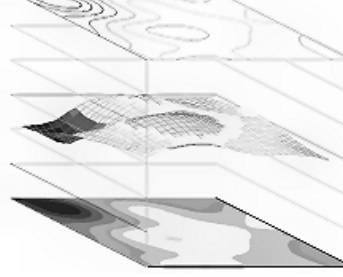
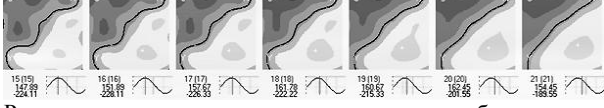
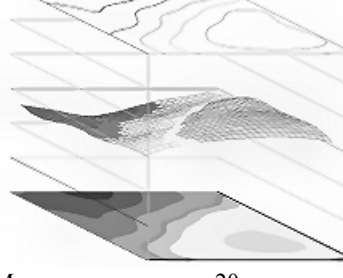
В табл. 2 приведены результаты измерений в виде карт распределения магнитного поля для 7 моментов времени. В этом случае распределение магнитного поля в заданной области пространства объекта из контрольной группы соответствует «фону» и является основой для сравнения с другими вариантами исследований МЖ.

ТАБЛИЦА 2



В следующей части эксперимента выполнены регистрация и анализ магнитного сигнала крыс, которым через кожу были введены наночастицы сульфида свинца размером 12,5 нм. Область измерений, как и ранее – в воздухе над печенью, а алгоритм измерений соответствует рис. 1. В первой серии исследований (три крысы) длительность экспозиции составляла один месяц, во второй серии (три крысы) – три месяца, и в третьей серии (три крысы) – два месяца. Часть результатов для этой серии экспериментов приведена в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3

Первая серия исследований (один месяц экспозиции)	
 <p>Распределение магнитного поля в границах области измерений над печенью МЖ с наночастицами сульфида свинца размером 12,5 нм для 7 (из 50) моментов времени</p>	<p>1.5012      1.5969</p>  <p>Магнитная карта для 26-го момента времени в трех режимах отображения</p>
Вторая серия исследований (три месяца экспозиции)	
 <p>Распределение магнитного поля в границах области измерений над печенью МЖ с наночастицами сульфида свинца размером 12,5 нм для 7 (из 50) моментов времени</p>	<p>2.2592      2.7766</p>  <p>Магнитная карта для 26-го момента времени в трех режимах отображения</p>
Третья серия исследований (два месяца экспозиции)	
 <p>Распределение магнитного поля в границах области измерений над печенью МЖ с наночастицами сульфида свинца размером 12,5 нм для 7 (из 50) моментов времени</p>	<p>3.0817      2.8034</p>  <p>Магнитная карта для 20-го момента времени в трех режимах отображения</p>

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 контрольной группы крыс, по сравнению с магнитным шумом в месте выполнения измерений показаны на рис. 2 и отображают в графическом виде диапазон возможной вариации результатов измерений магнитного сигнала в зависимости от условий его регистрации. Для сравнения там же приведены результаты вычислений для магнитного шума и МЖ контрольной группы.

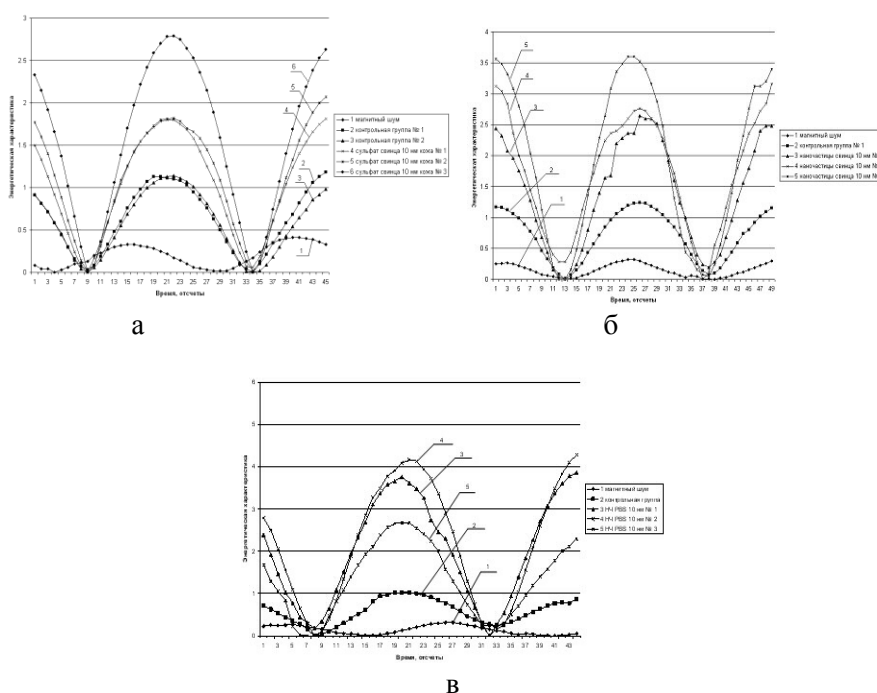
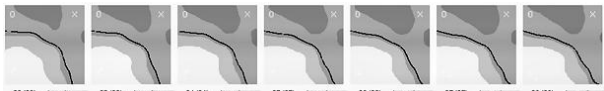
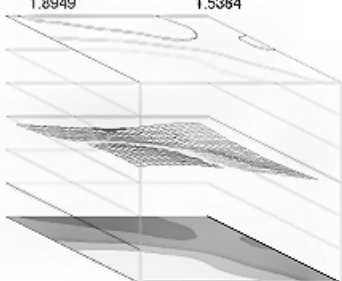
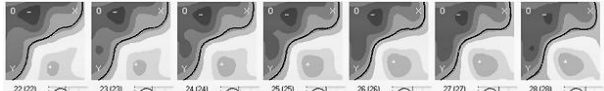
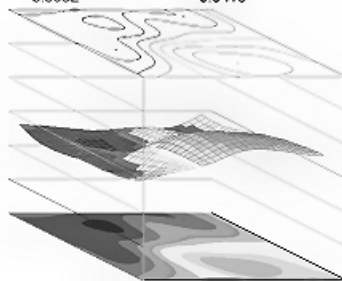
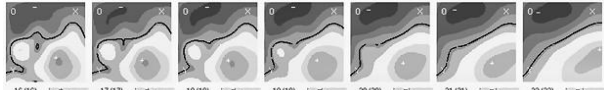
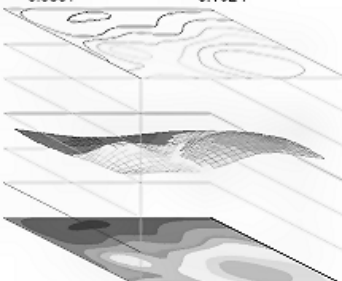


РИС. 2. Графическая зависимость параметра оценки магнитного сигнала над печенью крыс с наночастицами сульфида свинца размером 12,5 нм в пределах двух периодов подмагничивания: а – соответствует одному месяцу экспозиции, б – трем месяцам экспозиции и в – двум месяцам экспозиции

Далее выполнены регистрация и анализ магнитного сигнала трех крыс, которым через кожу были введены наночастицы сульфида свинца размером 100 нм. Область измерений, как и ранее – в воздухе над печенью, а алгоритм измерений соответствует рис. 1. В первой серии исследований (три крысы) длительность экспозиции составляла один месяц, во второй серии (три крысы) – три месяца, и в третьей серии (три крысы) – два месяца. Часть результатов для этой серии экспериментов приведена в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4

Первая серия исследований (один месяц экспозиции)	
 <p>22 (23) 22.53 23 (23) 23.06 24 (24) 24.11 25 (25) 25.17 26 (26) 26.23 27 (27) 27.29 28 (28) 28.35</p> <p>Распределение магнитного поля в границах области измерений над печью МЖ с наночастицами сульфида свинца размером 100 нм для 7 (из 50) моментов времени</p>	<p>1.8949 1.5364</p>  <p>Магнитная карта для 26-го момента времени в трех режимах отображения</p>
Вторая серия исследований (три месяца экспозиции)	
 <p>22 (23) 22.53 23 (23) 23.06 24 (24) 24.11 25 (25) 25.17 26 (26) 26.23 27 (27) 27.29 28 (28) 28.35</p> <p>Распределение магнитного поля в границах области измерений над печью МЖ с наночастицами сульфида свинца размером 100 нм для 7 (из 50) моментов времени</p>	<p>3.5992 3.3415</p>  <p>Магнитная карта для 26-го момента времени в трех режимах отображения</p>
Третья серия исследований (два месяца экспозиции)	
 <p>16 (16) 16.16 17 (17) 17.17 18 (18) 18.18 19 (19) 19.19 20 (20) 20.20 21 (21) 21.21 22 (22) 22.22</p> <p>Распределение магнитного поля в границах области измерений над печью МЖ с наночастицами сульфида свинца размером 100 нм для 7 (из 50) моментов времени</p>	<p>3.5651 3.1024</p>  <p>Магнитная карта для 18-го момента времени в трех режимах отображения</p>

Результаты вычислений энергетической характеристики магнитного поля в границах области измерений для каждой из 50 карт магнитного поля показаны на рис. 3. Для сравнения там же приведены и результаты вычислений этой характеристики для магнитного шума и животных контрольной группы.

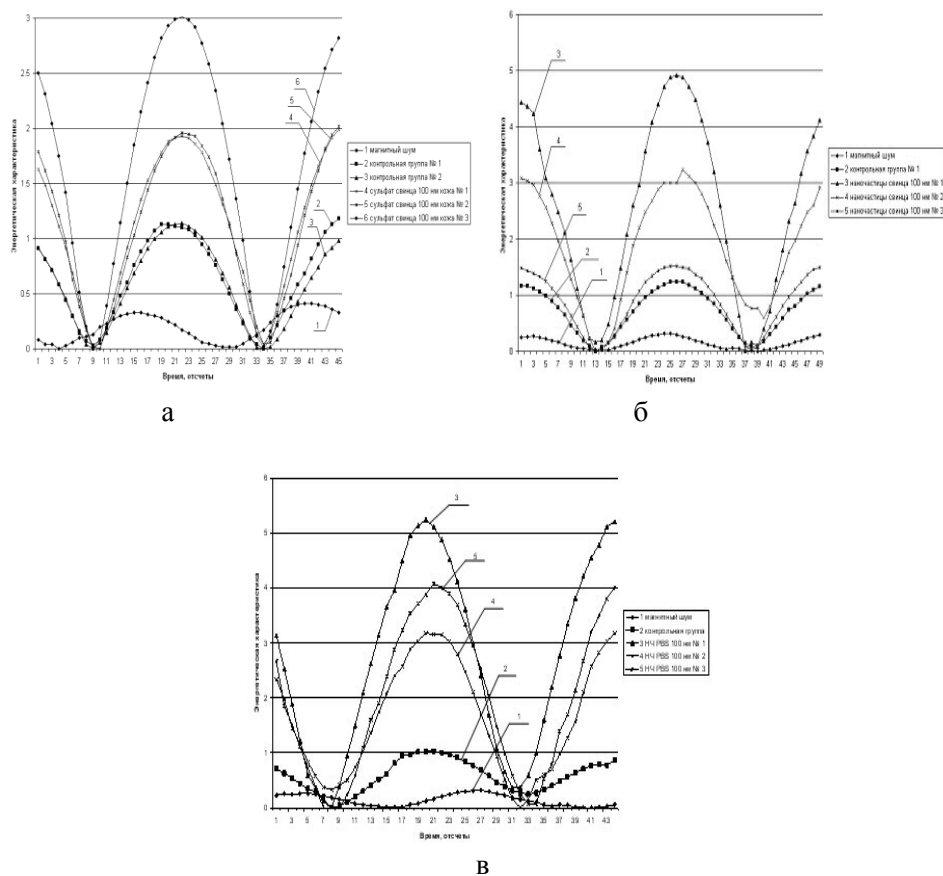
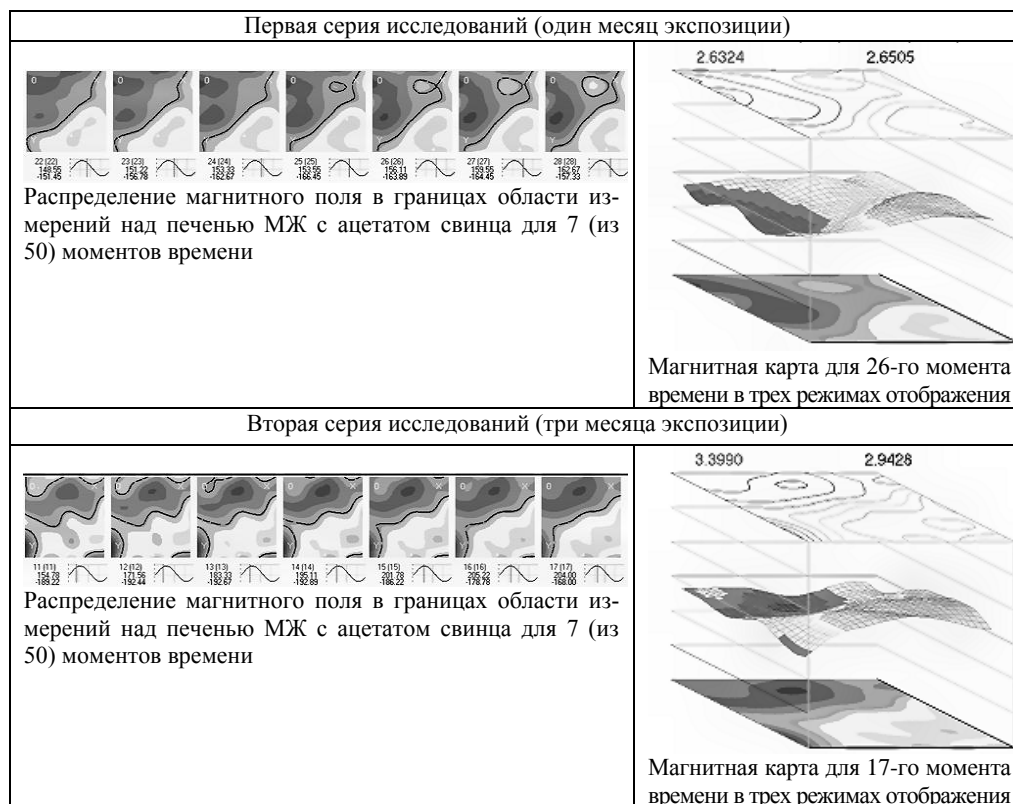


РИС. 3. Графическая зависимость параметра оценки магнитного сигнала над печенью крыс с наночастицами сульфида свинца размером 100 нм в пределах двух периодов подмагничивания: а – соответствует одному месяцу экспозиции, б – трем месяцам экспозиции и в – двум месяцам экспозиции

На заключительном этапе выполнены регистрация и анализ магнитного сигнала трех крыс, которым на кожу был нанесен ацетат свинца. Область измерений, как и ранее – в воздухе над печенью, а алгоритм измерений соответствует рис. 1. В первой серии исследований (три крысы) длительность экспозиции составляла один месяц, во второй серии (три крысы) – три месяца. Часть результатов для этой серии экспериментов приведена в табл. 5.



ТАБЛИЦА 5



Результаты вычислений энергетической характеристики магнитного поля в границах области измерений для каждой из 50 карт магнитного поля показаны на рис. 4. Для сравнения там же приведены и результаты вычислений этой характеристики для магнитного шума и животных контрольной группы.

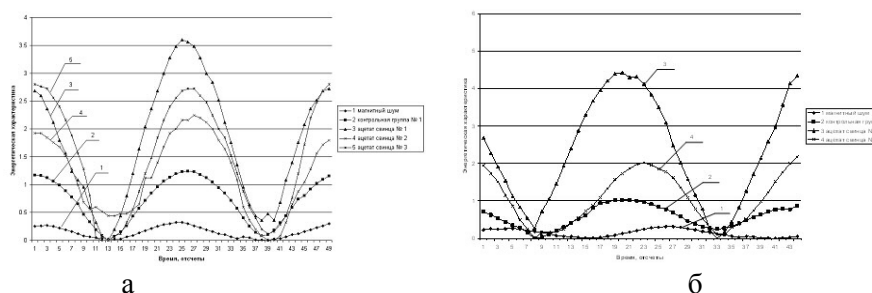


РИС. 4. Графическая зависимость параметра оценки магнитного сигнала над печенью крыс с ацетатом свинца в пределах двух периодов подмагничивания: а – соответствует одному месяцу экспозиции и б – трем месяцам экспозиции

**Выводы.**

1. Использование бесконтактного магнитометрического метода для исследования воздействия наночастиц свинца на неповрежденную кожу крыс позволяет зарегистрировать достаточно выраженные магнитные сигналы, что свидетельствует о способности проникновения наночастиц свинца через неповрежденную кожу.

2. Полученные результаты измерений показали, что магнитный сигнал имеет наибольшую амплитуду при воздействии на кожу наночастиц сульфида свинца со средним размером 100 нм.

3. На данной серии исследований установлено влияние длительности воздействия наночастиц сульфида свинца на неповрежденную кожу крыс на характеристики магнитного сигнала над областью печени животных, что является важной предпосылкой для разработки новых способов интегральной оценки токсичности наночастиц различных соединений свинца.

4. Метод бесконтактного магнитометрического исследования, как способ для исследования возможных изменений структуры и свойств магнитных сигналов наночастиц в организме мелких животных требует дальнейшего экспериментального изучения.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Melnyk N.A., Lugovskiy S.P., Didenko M.N. Морфологические изменения кожи крыс при длительном воздействии на ее неповрежденную поверхность наночастиц сульфида свинца (нч PbS). *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*. 2017. Vol. 3 (19). P. 63–71.
2. Войтович И.Д., Примин М.А., Недайвода И.В. и др. Регистрация и анализ слабых магнитных полей, созданных в воздухе физическими и биологическими объектами с наночастицами железа и других материалов. *УСМ*. 2012. № 1. С. 66–76.
3. Voitovych I.D., Primin M.A., Sosnytsky V.N. Application of SQUIDs for registration of biomagnetic signals. *Low Temperature Physics*. 2012. Vol. 38. N 4. P. 311–320.
4. Кожем'якін Ю.М., Хромов О.С., Філоненко М.А., Сайфетдінова Г.А. Науково-практичні рекомендації з утримання лабораторних тварин та роботи з ними. К.: Авіцена. 2002. 156 с.
5. European convention for the protection of vertebrate animal used for experimental and other scientific purposes. Council of Europe, Strasbourg, 1986. 53 p.
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 11.09.2018