

# ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ВАРИАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

**Хлопов Борис Васильевич,**

АО "Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт  
им. академика А.И. Берга", Москва, Россия, [hlopovu@yandex.ru](mailto:hlopovu@yandex.ru)

**Андреев Григорий Иванович,**

АО "Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт  
им. академика А.И. Берга", Москва, Россия

**Колесников Николай Павлович,**

АО "Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт  
им. академика А.И. Берга", Москва, Россия, [samvalser@yandex.ru](mailto:samvalser@yandex.ru)

**Самойлова Валерия Сергеевна,**

АО "Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт  
им. академика А.И. Берга", Москва, Россия

**Шашурин Василий Дмитриевич,**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия, [shashurin@bmstu.ru](mailto:shashurin@bmstu.ru)

**Мешков Сергей Анатольевич,**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия, [sb67241@mail.ru](mailto:sb67241@mail.ru)

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-3-11-15

**Ключевые слова:** магнитный обнаружитель, магнитометр, вариации магнитного поля, летательный аппарат, метаматериалы, композитный материал

Показана возможность обнаружения аномалий электромагнитных полей, создаваемых промышленными и специальными объектами, а также образцами специальной техники скрытой на поверхности земли или под землей. Показано, что эта задача решается при создании бортового обнаружителя оборудованного высокочувствительными измерительными магнитометрическими средствами. В случае обнаружения аномального изменения магнитного поля на Земле с вариациями магнитного поля или электромагнитным излучением необходимо проводить измерение вариаций и при получении электротехнических параметров объекта учитывать вариации магнитного поля Земли. Рассмотрены отдельные отечественные и зарубежные методы поиска и обнаружения подводных и надводных объектов при помощи бортовых магнитометрических средств, которые позволяют проводить обследование назначенного района поиска подводного или наземного объекта. Рассмотренная в статье информация из зарубежного источника, подтвердила правильность выбранного направления исследования и разработки процесса обнаружения скрытых на местности объектов с более высокой точностью. Приведены сравнительные характеристики магнитных обнаружителей, состоящих на вооружении иностранных армий, которые эффективно используются в условиях противодействия гидроакустическим средствам разведки, а также наземные образцы современных магнитных обнаружителей, состоящих на вооружении иностранных армий, обладающие чувствительностью не более 0,1 нТл, что позволяет различать образцы военной техники на расстоянии до 50 м. Рассмотренный в матери-

алах статьи обнаружитель, размещенный на летательном аппарате, с возможностью измерения и компенсации вариаций магнитных полей обеспечивает обнаружение отражённых сигналов от объектов излучения, измерение технических характеристик сигналов, регистрацию магнитного поля на участках земной поверхности и в атмосфере. Для исключения помех на пути распространения радиоволн от передатчика обнаружителя до объекта излучения и обратно, с учётом вариации магнитного поля Земли, в обнаружителе использовано антенное устройство с резким уменьшением уровня боковых лепестков спектра сигнала. В антенном устройстве разработчики на дне резонатора расположили соленоид, с магнитной опаловой матрицей из нанокompозитного мультиферроидного материала и матричные преобразователи магнитных полей. Для управления и облучения нанокompозита предложен соленоид с плоской спиральной магнитной полеобразующей системой, повышающей интегральную электромагнитную восприимчивость с одновременным уменьшением экранирующих воздействий. Полученные экспериментальные зависимости магнитной восприимчивости нанокompозитного мультиферроидного материала, размещенного в антенном устройстве обнаружителя, подтверждают правильность принятого решения обнаружения на земле объекта с вариациями магнитного поля или электромагнитным излучением, которые необходимо учитывать при получении параметров объекта при изменении магнитного поля Земли, а также влияния атмосферного воздействия и вносить необходимые поправки при проведении расчетов по уточнению дислокации объекта.

## Информация об авторах:

**Хлопов Борис Васильевич**, д.т.н., советник заместителя генерального директора, АО "Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга", Москва, Россия

**Андреев Григорий Иванович**, д.т.н., профессор, академик Академии военных наук, академик РАЕН, генеральный директор, АО "Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга", Москва, Россия

**Колесников Николай Павлович**, д.т.н., заместитель генерального директора, АО "Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга", Москва, Россия

**Самойлова Валерия Сергеевна**, инженер научно-технического отдела, АО "Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга", Москва, Россия

**Шашурин Василий Дмитриевич**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой "Технологии приборостроения", МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Мешков Сергей Анатольевич**, к.т.н., доцент кафедры "Технологии приборостроения", МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

## Для цитирования:

Хлопов Б.В., Андреев Г.И., Колесников Н.П., Самойлова В.С., Шашурин В.Д., Мешков С.А. Оборудование для компенсации вариаций магнитного поля Земли // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №3. С. 11-15.

## For citation:

Hlopov B.V., Andreev G.I., Kolesnikov N.P., Samoylova V.S., Shashurin V.D., Meshkov S.A. (2020) Equipment for compensation of variations of the Earth's magnetic field. T-Comm, vol. 14, no.3, pp. 11-15. (in Russian)

### Введение

Наблюдение за окружающей средой, связь на глубине и с кораблями на поверхности, передача различных сигналов и команд на большие расстояния и многие другие задачи в настоящее время успешно решаются с помощью космической и гидроакустической связи. Последнее время повысился интерес и к освоению «внутреннего космоса» – в глубинах океанов и морей, на поверхности воды и под водой. Становится одной из важных задач обнаружение и распознавание промышленных и специальных объектов, а также образцов специальной техники скрытой на поверхности земли. В материалах статьи показано, что эту задачу можно решить при создании обнаружителя аномалий электромагнитных полей, размещаемого на летательных аппаратах (вертолетах, самолетах, космических аппаратах). Промышленные и военные объекты, являясь носителями электромагнитного излучения, размещенные на земле, с большой вероятностью можно отнести к стационарным объектам.

В этом случае при обнаружении на земле с вариациями магнитного поля или электромагнитным излучателем необходимо при получении электротехнических параметров объекта учитывать вариации магнитного поля Земли. Окружающая Землю атмосфера оказывает влияние на распространение радиоволн и является носителем вариаций магнитного поля Земли. Границы областей вариаций выражены не резко и зависят от времени и географического места размещения объекта обнаружения. В этом случае при обнаружении на земле объекта с вариациями магнитного поля или электромагнитным излучателем необходимо при получении параметров объекта учитывать изменения магнитного поля Земли, а также влияние атмосферы и вносить необходимые поправки при проведении расчетов.

### Бортовые магнитометрические средства

Методы поиска и обнаружения подводных и надводных объектов при помощи бортовых магнитометрических средств позволяют проводить обследование назначенного района поиска подводного объекта прямолинейными параллельными галсами при помощи скалярного магнитометра, установленного на подвижном, например авиационном носителе [1]. Используется метод определения местоположения объекта на местности [2] при котором с летательного аппарата с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой лоцируют местность и формируют её радиолокационное изображение, затем обнаруживают объекты, проводят их распознавание и осуществляют привязку объектов к радиолокационному изображению, например, за счёт привязки к ориентирам на местности.

Эти методы для правильного обнаружения подводных и наземных объектов, требуют согласования курса движения носителя с физическими параметрами, которыми характеризуется район поиска, его положение на местности для летательного аппарата трудно реализуем, так как радиолокатор с синтезированной апертурой с необходимыми для этого характеристиками достаточно сложен. Магнитные обнаружители, состоящие на вооружении иностранных армий [1], обладают чувствительностью 0,1 нТл, что позволяет обнаруживать подводные лодки на расстоянии до 900 м.

Они эффективно используются в условиях противодействия гидроакустическим средствам разведки. Все противолодочные самолеты США оснащены магнитными обнаружителями типа AM/ASQ-10 с дальностью действия до 300 м, а также AN/ASQ-81 с чувствительностью 0,16 нТл. Этими средствами оснащаются противолодочные самолеты P-3C, S-3A и противолодочные вертолеты SH-2D(F); SH-3 ВМС США. Наземные образцы [3] современных магнитных обнаружителей, состоящих на вооружении иностранных армий, обладают чувствительностью не более 0,1 нТл, что позволяет различать образцы военной техники на расстоянии до 50 м.

### Устройство обнаружения вариации магнитного поля Земли

Обнаружитель аномалий электромагнитных полей, размещенный на летательном аппарате, с возможностью изменения и компенсации вариаций магнитных полей при получении электротехнических характеристик скрытых объектов, обеспечивает обнаружение отражённых сигналов от объектов излучения, измерение технических характеристик сигналов, регистрацию магнитного поля на участках земной поверхности и в атмосфере [4]. Для исключения помех на пути распространения радиоволн от передатчика до объекта излучения и обратно, с учётом вариации магнитного поля Земли, с внесением необходимых компенсационных поправок, с одновременным уменьшением уровня помех, в обнаружителе использовано антенное устройство с резким уменьшением уровня боковых лепестков спектра сигнала.

При этом существенно увеличилась электромагнитная совместимость составных частей обнаружителя вариаций магнитного поля. Прием электромагнитных излучений и сигналов в широком диапазоне частот был получен за счет выполнения антенного устройства [4-6], обеспечивающего автоматическое изменение «высоты подвеса» области излучения на спиральном излучателе, равной четверти длины рабочей волны, независимо от значения длины рабочей волны. Антенное устройство позволяет достичь высокого равномерного коэффициента усиления в широкой, практически неограниченной полосе частот и плавной перестройки, обеспечивающей обзор в рабочем диапазоне частот. На рисунке 1 приведена структурная схема бортового обнаружителя. Бортовой обнаружитель с компенсацией вариаций магнитных полей [4,7-9], содержит: антенное устройство-1, приёмопередающий тракт: электронный переключатель-2, передатчик зондирующих сигналов-3, приёмник отражённых зондирующих сигналов-4, приёмник вариаций магнитного поля Земли-5, систему обработки информации – 6, высьотемер-7.

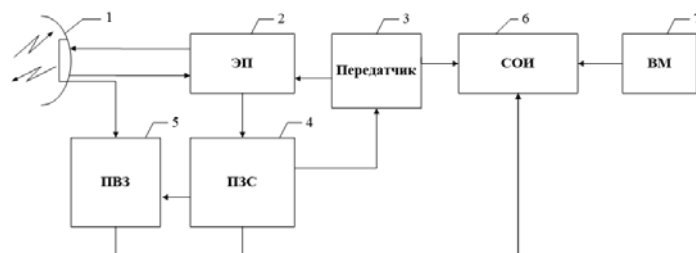


Рис. 1. Структурная схема обнаружения объектов бортовым обнаружителем с компенсацией вариаций магнитных полей

### Антенное устройство обнаружителя

В бортовом обнаружителе антенное устройство выполнено в виде цилиндрического резонатора с заглушенным плоским дном, в которое вершиной направлен спиральный излучатель, навитый на симметричном теле с осью вращения, например конусе, при этом угол  $\alpha$  между осью вращения и образующей линией определяется из соотношения:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{2\sqrt{\epsilon_1}}{\pi\sqrt{\epsilon_2}}\right), \quad (1)$$

где  $\epsilon_1$  – диэлектрическая проницаемость материала тела, на котором навита спираль, а  $\epsilon_2$  – диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей резонатор, а расстояние от плоского дна резонатора до каждого витка равно  $\pi d/4$ , т.е.  $\lambda/4$ . Внешние стенки цилиндрического резонатора выполнены из токопроводящего материала, например алюминия, а внутренние стенки цилиндрического резонатора образуют полеобразующую систему. На внутренней боковой стороне цилиндрического резонатора прикреплён нанокompозитный мультиферроидный материал [10, 11]. На дне цилиндрического резонатора находится соленоид, внутри которого размещены: магнитная опаловая матрица из нанокompозитного мультиферроидного материала [12], первый матричный преобразователь магнитных полей, магниточувствительная плёнка и второй матричный преобразователь магнитных полей.

На рисунке 2 приведены полученные экспериментально зависимости магнитной восприимчивости нано композитного мультиферроидного материала от температуры при  $H=30$  кЭ для образцов опаловых матриц, чьи межсферические нанополости частично заполнены кластерами: 1 –  $Ni_3Fe$ ; 2 –  $Co + Ni$ ; 3 –  $Ni_3Fe + Co + Ni$ .

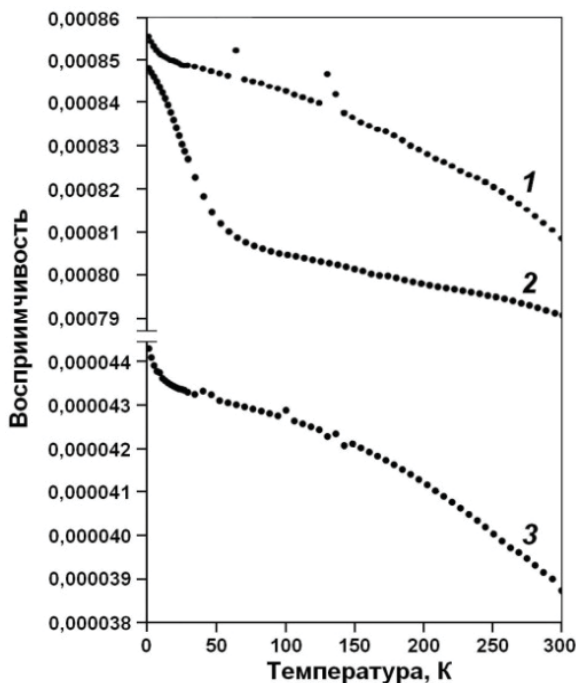


Рис. 2. Зависимости магнитной восприимчивости от температуры при  $H=30$  кЭ нанокompозитного мультиферроидного материала из опаловой матрицы

Благодаря высокой восприимчивости нанокompозитного мультиферроидного материала из опаловой матрицы [12, 14], размещенного в антенном устройстве, обеспечивается обнаружение скрытых объектов с высокой чувствительностью менее 0,1 нТл и с возможностью измерения магнитных полей с компенсацией вариаций магнитных полей. Вариации магнитных полей регистрируются спиральным излучателем и матричным преобразователем на заглушенном плоском дне резонатора соединенным с входом приёмопередающего тракта и с управляющим соленоидом.

Система поиска [4] выполнена, в виде последовательно соединённых: системы обработки информации с бортовой вычислительной аппаратурой, высотомера. Система обработки информации в своем составе имеет блок вычислительных средств, который после предварительной обработки информации передает ее на вход бортовой вычислительной аппаратуры.

Бортовая вычислительная аппаратура предназначена для обнаружения источника излучения и формирования сигнала управления приёмом и передачей зондирующих импульсов. Блок вычислительных средств также предназначен для уточнения параметров высоты бортового обнаружителя, обработки параметров принятого сигнала с вариациями магнитного поля Земли. Приёмник вариаций магнитного поля Земли одновременно с бортовым обнаружителем обеспечивает в реальном масштабе времени регистрацию относительного уровня напряжённости вариации магнитного поля Земли и электротехнические характеристики скрытых объектов.

### Заключение

1. В работе описаны новые перспективные предложения построения приборов для изделий РЭА. Приведена разработанная структурная схема оборудования для компенсации вариаций магнитного поля Земли. Рассмотрены отдельные отечественные и зарубежные методы поиска и обнаружения подводных и надводных объектов при помощи бортовых магнитометрических средств.

2. Разработанный и предложенный метод поиска скрытых объектов с использованием измеренных параметров вариаций магнитного поля создаваемых промышленными и военными объектами обеспечивает регистрацию магнитного поля с высокой чувствительностью менее 0,1 нТл с компенсацией вариаций магнитных полей.

3. В составе оборудования обнаружителя рассматриваемой схеме антенное устройство позволяет одновременно с приемом и передачей зондирующих сигналов обеспечивать магнитную восприимчивость мультиферроидными материалами и регистрировать вариации магнитного поля. Это позволяет улучшить технические магнитометрические характеристики и предоставить возможность увеличить мощность передающих устройств, а следовательно, и максимальную дальность обнаружения источника излучения.

## Литература

1. Яроцкий В.А. Методы обнаружения и определения местоположения объектов по их постоянному магнитному полю // Зарубежная радиоэлектроника, 1984. №3. С.48.
2. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. М: Радиотехника, 2005. 367 с.
3. Патент RU2332681C2, приоритет от 27.04.2008.
4. Патент RU2709787C1, приоритет от 27.05.2019.
5. Хлопов Б.В., Чучева Г.В., Митягина А.Б. Фазовые изменения мультиферроидных магнитных материалов, применяемых в системах внешней памяти // Известия саратовского университета. Новая серия. Серия: физика. том 17. № 1. 2017. С. 33-43.
6. Yuanzhe Piao. Multi-Ferroc Polymer Nanoparticle Composites for Next Generation Metamaterials // AOARD. Final Report. April 25th 2016. P.13.
7. Самойлович М.И., Белянин А.Ф., Бовтун В., Чучева Г.В., Хлопов Б.В. Особенности фазовых превращений и кристаллизации металлов и соединений на их основе (Ni, Fe) в межсферических полостях решетчатых упаковок наносфер SiO<sub>2</sub> // Сборник научных трудов XXI Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России», XXVIII Международного симпозиума «Тонкие пленки в электронике», VIII Международной научно-технической конференции «Наноинженерия». 8-10 сентября 2016 г. Москва, Россия. С. 355-360.
8. Хлопов Б.В., Шашурин В.Д., Чучева Г.В., Самойлова В.С., Митягина А.Б. Исследование возможности мультиферроидных метаматериалов на основе опаловых матриц изменять свои параметры под воздействием внешнего электромагнитного поля // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Том 11. №10. С. 38-44.
9. Хлопов Б.В., Самойлович М.И., Митягин А.Ю. Исследование пространственного мультиплицирования импульсного магнитного поля образцами метаматериалов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. №1. С. 48-50.
10. Хлопов Б.В., Андреев Г.И., Самойлова В.С., Шашурин В.Д., Мешков С.А. Технологическое оборудование инициализации структурированных композитных материалов// T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. № 9. С 30-33.
11. Самойлович М.И., Белянин А.Ф., Клещева С.М., Цветков М.Ю. Особенности фазовых превращений и кристаллизации в нанополостях решетчатых упаковок наносфер SiO<sub>2</sub> // Наука и технологии в промышленности. 2010. № 4. С. 73-84.
12. Ustinov V.V., Rinkevich A.B., Perov D.V., Samoilovich M.I., Klesheva S.M. Anomalous magnetic antiresonance and resonance in ferrite nanoparticles embedded in opal matrix // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2012. V. 324. P.78-82.
13. Nuzhnyy D., Yanek P., Petzelt J., Bovtun V., Kempa M., Gregora I., Savinov M., Krupkova R., Sudańska V., Buršák J., Samoylovich M.I., Schranz W. Properties of BaTiO<sub>3</sub> confined in nanoporous Vycor and artificial opal – opal // Proc. Appl. Ceram. 2010. Vol. 4, pp. 215–223.
14. Sarychev A.K., Shalaev V.M. Electrodynamics of metamaterials. World Scientific and Imperial College Press, 2007. 200 p.



## EQUIPMENT FOR COMPENSATION OF VARIATIONS OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD

**Boris V. Hlopov**, JSC "CNIRTI named after academician A.I. Berg", Russian Federation, Moscow, Russia, [hlopovu@yandex.ru](mailto:hlopovu@yandex.ru)

**Grigory I. Andreev**, JSC "CNIRTI named after academician A.I. Berg", Russian Federation, Moscow, Russia

**Nikolai P. Kolesnikov**, Deputy General Director, JSC "CNIRTI named after academician A.I. Berg", Moscow, Russia,

**Valeria S. Samoylova**, JSC Central Research Radio Engineering Institute of the Academician A.I. Berg, Moscow, Russia, [samvalser@yandex.ru](mailto:samvalser@yandex.ru)

**Vasily D. Shashurin**, MGTU of N.E. Bauman, Moscow, Russia, [shashurin@bmstu.ru](mailto:shashurin@bmstu.ru)

**Sergey A. Meshkov**, MGTU of N.E. Bauman, Moscow, Russia, [sb67241@mail.ru](mailto:sb67241@mail.ru)

**Abstract**

The article shows the possibility of detecting anomalies of electromagnetic fields created by industrial and special objects, as well as samples of special equipment hidden on the earth's surface or underground. It is shown that this problem is solved when creating an on-Board detector equipped with highly sensitive measuring magnetometric means. If an abnormal change in the magnetic field on Earth is detected with variations in the magnetic field or electromagnetic radiation, it is necessary to measure the variations and take into account the variations in the Earth's magnetic field when obtaining the electrical parameters of the object. The article discusses some domestic and foreign methods of searching and detecting underwater and surface objects using onboard magnetometric tools that allow you to conduct a survey of the designated search area for an underwater or ground object. The information considered in the article from a foreign source confirmed the correctness of the chosen direction of research and development of the process of detecting objects hidden in the area with higher accuracy. Comparative characteristics of magnetic detectors used by foreign armies, which are effectively used in the conditions of counteraction to hydroacoustic means of reconnaissance, as well as ground samples of modern magnetic detectors used by foreign armies, which have a sensitivity of no more than 0.1 nTl, which allows distinguishing samples of military equipment at a distance of up to 50 m. The detector considered in the article, placed on an aircraft, with the ability to measure and compensate for variations in magnetic fields, provides detection of reflected signals from radiation objects, measurement of technical characteristics of signals, registration of the magnetic field on the earth's surface and in the atmosphere. To avoid interference in the path of propagation of radio waves from the detector transmitter to the radiation object and back, taking into account the variation of The earth's magnetic field, the detector uses an antenna device with a sharp decrease in the level of the side lobes of the signal spectrum. In the antenna device, the developers placed a solenoid with a magnetic opal matrix made of nano-composite multiferroic material at the bottom of the resonator [5-8]. To control and irradiate the nanocomposite, a solenoid with a flat spiral magnetic field-forming system [1] is proposed, which increases the integral electromagnetic susceptibility while reducing the shielding effects. The obtained experimental dependences of the magnetic susceptibility of nano-composite multiferroic material placed in the detector antenna device confirm the correctness of the decision to detect an object on earth with variations in the magnetic field or electromagnetic radiation, which must be taken into account when obtaining the parameters of the object when the earth's magnetic field changes, as well as the influence of atmospheric influence, and make the necessary corrections when performing calculations to clarify the object's location.

**Keywords:** magnetic detector, magnetometer, magnetic field variations, aircraft, metamaterials, composite material.

**References**

1. Yarotsky V.A. (1984). Methods for detecting and determining the location of objects by their constant magnetic field. *Foreign radio electronics*, no. 3, pp. 48.
2. Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. (2005). *Radio Vision. Earth remote sensing radar systems*. Moscow: Radio Engineering. 367 p.
3. Patent RU2332681C2, priority from 16.10.2006
4. Patent RU2332681C2, priority from 16.10.2006
5. Khlopov B.V., Chucheva G.V., Mityagin, A.B. A Phase change of the multiferroic magnetic materials used in the systems external storage. *News of Saratov University. New series. Series: Physics*. Vol. 17. No. 1. 2017, pp. 33-43.
6. Yuanzhe Piao. (2016). Multi-Ferroc Polymer Nanoparticle Composites for Next Generation Metamaterials. *AOARD. Final Report*. April 25th, pp. 13.
7. Samoilovich M.I., Belyanin A.F., Bovtun V., Chucheva G.V., Khlopov B.V. (2016). Features of phase transformations and crystallization of metals and compounds based on them (Ni, Fe) in interspheric cavities of SiO<sub>2</sub> nanospheric lattice packages. *Collection of scientific papers of the XXI International scientific and technical conference "High technologies in Russian industry", XXVIII International Symposium "Thin films in electronics", VIII International scientific and technical conference "Nanoengineering"*. September 8-10, Moscow, Russia, pp. 355-360.
8. Khlopov B.V., Shashurin V.D., Chucheva G.V., Samoilova V.S., Mityagina A B. (2017). Investigation of the possibility of multiferroic metamaterials based on opal matrices to change their parameters under the influence of an external electromagnetic field. *T-Comm*. Vol. 11. No. 10, pp. 38-44.
9. Khlopov B.V., Samoilovich M.I., Mityagin A.Yu. (2013). Investigation of spatial multiplication of a pulsed magnetic field by metamaterial samples. *T-Comm*. 2013. No. 1, pp. 48-50.
10. Khlopov B.V., Andreev G.A., Samoilova V.S., Shashurin V.D., Meshkov S.A. (2019). Technological equipment for initialization of structured composite materials. *T-Comm*. Vol. 13. No. 9, pp. 30-33.
11. Samoylovich M.I., Belyanin A.F., Klesheva S.M., Tsvetkov M.Yu. (2010). Features of phase transformations and crystallization in nanocavities of lattice packing of SiO<sub>2</sub> nanospheres. *Science and technology in industry*. № 4, pp. 73-84.
12. Ustinov V.V., Rinkevich A.B., Perov D.V., Samoilovich M.I., Klesheva S.M. (2012). Anomalous magnetic antiresonance and resonance in ferrite nanoparticles embedded in opal matrix. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. Vol. 324, pp. 78-82.
13. Nuzhnyy D., Vanek P., Petzelt J., Bovtun V., Kempa M., Gregora I., Savinov M., Krupkova R., Studnicka V., Bursik J., Samoylovich M.I., Schranz W. (2010). Properties of BaTiO<sub>3</sub> confined in nanoporous Vycor and artificial opal – opal. *Proc. Appl. Ceram*. Vol. 4, pp. 215-223.
14. Sarychev A.K., Shalaev V.M. (2007). *Electrodynamics of metamaterials*. World Scientific and Imperial College Press. 200 p.