

# Разработка оптической системы формирования изображения для исследования параметров магнитной дорожки от подвижного объекта

С.Э. Логунов<sup>1</sup>, В.В. Давыдов<sup>1,2</sup>, Н.С. Мязин<sup>1</sup>, В.Ю. Рудь<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии, Институт 5, Большие Вяземы, Россия, 143050

**Аннотация.** Обоснована необходимость исследования магнитной дорожки от подвижного объекта. Разработана оптическая система для обнаружения магнитной дорожки на морской глубине от подвижного магнитного объекта. Предложена методика обработки и расшифровки оптических изображений, формируемых с использованием феррофлюидной ячейки и лазерного излучения. Представлены результаты экспериментальных исследований.

## 1. Введение

Исследования физических явлений, которые образованы в результате взаимодействия магнитного поля с веществом является одной из актуальных и наиболее сложных задач, как фундаментальной, так и прикладной физики [1-8]. Результаты многочисленных исследований показали, что в вариациях магнитного поля заложен большой объем информации [6-14]. Если расшифровать этот объем информации, то можно получить новые знания о строении вещества, различных физических процессах, динамики их развития и т.д. Эта информация поможет более полно описать различные явления, определить параметры и разработать методики для их измерения при практическом их использовании.

Одним из наиболее сложных с использованием вариации магнитного поля являются исследования магнитной дорожки. Это явление образуется при движении магнитного объекта в различной среде. Наиболее ярким примером магнитных дорожек является движение комета или метеорита в воздушном пространстве, корабля на море и т.д. Возникновение магнитной дорожки связано с изменением структуры силовых линий магнитного поля в зоне перемещения магнитного объекта.

Наибольшие сложности возникают при исследовании магнитной дорожки на глубине морской акватории при большом давлении водных слоев. В этом случае влияние различных внешних факторов, которые присутствуют при образовании магнитной дорожки в других условиях (например, течение воды, ветер и т.д.) на процессы разрушения дорожки носят несущественный характер. Большинство используемых в настоящее время методов контроля обстановки в различных районах водной акватории не позволяют обнаружить подвижный магнитный объект на глубинах более 500-530 м [15-23]. Единственным эффективным методом обнаружения на таких глубинах магнитных объектов является использование высокоточных

магнитометров, особенно квантовых, обладающих высокой чувствительностью. Высокая чувствительность позволяет измерять небольшие вариации магнитного поля [10-14, 23-26]. Информация о их изменении позволяет определить в заданном районе наличие магнитного объекта, как подвижного, так и стационарного. Погружая магнитометр на глубину, можно установить наличие в морской среде магнитной дорожки от подвижного объекта. Также на основе показаний данного прибора можно исследовать изменение вариаций магнитного поля в различных частях магнитной дорожки. Определить скорость её разрушения.

Проведение таких экспериментов в реальных условиях достаточно сложный процесс. Кроме того, для поиска магнитной дорожки в большом секторе морской глубины необходимо задействовать много магнитометров (более 10) и специальных судов по их обслуживанию. Это реализовать крайне сложно. Поэтому для получения информации необходимой для подготовки и проведения экспериментов на морских глубинах нами был разработан экспериментальный стенд и оптический метод для исследования магнитной дорожки в лаборатории. Особое внимание в данном методе было уделено формированию оптических изображений при движении магнитного объекта. Кроме того, необходимо отметить, что для обнаружения магнитной дорожки необходима надежная система устойчивая к погружениям на большие глубины. Эта система должна обеспечивать процесс измерения вариаций магнитного поля в большой плоскости и легко перемещаться на глубину. Её разработка требует проведения дополнительных исследований.

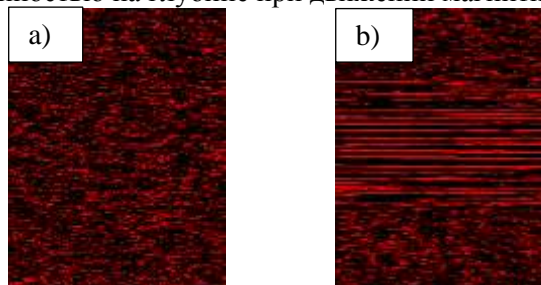
## **2. Методика обнаружения магнитной дорожки и экспериментальная установка**

Исследуемая нами магнитная дорожка образуется в процессе замыкания и размыкания силовых линий магнитного поля на магнитном объекте при его движении. Необходимо отметить, что молекулы, расположенные рядом с магнитным объектом, намагничиваются (магнитное поле подвижного магнитного объекта может быть в 20-30 раз больше магнитного поля Земли). Кроме того, за ушедшим подвижным магнитным объектом на глубине образуется пустое пространство. Это пространство заполняется с большой скоростью, так как давление на таких глубинах более 55 атм. При большой скорости подвижного объекта процесс образования магнитной дорожки становится очень быстрым, в котором преобладают турбулентные потоки.

На основе проведенных исследований структуры силовых линий магнитного поля под действием вариаций возмущающего магнитного поля [20, 27-30] было решено создать магнитную дорожку в водном растворе однодоменных наночастиц магнетита (ферромагнитная жидкость), средний размер частиц которых составляет 12 нм. Объемная концентрация частиц магнетита 0.025. В роли поверхностного вещества (ПАВ) выступала олеиновая кислота. Магнитная жидкость размещается в кварцевой кювете [31-33]. Характер движения магнитного объекта в ферромагнитной жидкости воспроизводился точечным магнитным полем «магнитного пера» с индукцией на конце порядка 1 Т. Объем действия возмущающего магнитного поля, которое перемещалось, составлял 1 мм<sup>3</sup>. На прозрачную грань кюветы поступало лазерное излучение с  $\lambda = 632.8$  нм. На другую грань кюветы был нанесен материал непрозрачный для лазерного излучения. Вдоль этой грани перемещалось «магнитное перо». Кювета с ферромагнитной жидкостью находилась в лабораторном магнитном поле Земли. В отраженном свете специализированной видеокамерой регистрируются спекл картины. Более подробно работа экспериментальной установки по регистрации спекл структур в отраженном излучении рассмотрена в работах [27-30].

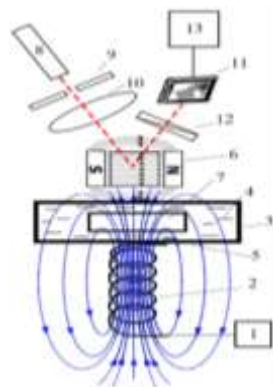
На рисунке 1 представлены оптические изображения в отраженном лазерном излучении без воздействия «магнитного пера» на ферромагнитную жидкость и при его движении вдоль непрозрачной грани кварцевой кюветы. В зоне действия «магнитного пера» наночастицы размещаются на силовых линиях магнитного поля (рисунок 1.б). Образуются агломераты (спекл структуры). Необходимо отметить, что при большой скорости движения «магнитного пера» вдоль стенки на поверхности магнитной жидкости возникает волна. Это связано с тем, что под действием сильного переменного магнитного поля возникает турбулентное движение частиц магнетита в феррофлюидной жидкости по причине резкого изменения энергии с

увеличением индукции магнитного поля. Этот процесс воспроизводит турбулентное движение молекул воды с намагниченностью на глубине при движении магнитного объекта.



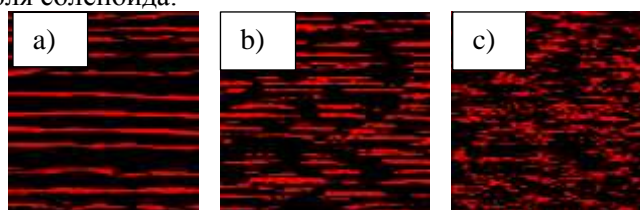
**Рисунок 1.** Дифракционная картина лазерного излучения в случае размещения магнитной жидкости: (а) в магнитном поле Земли; (б) в магнитном поле при движении магнитного пера.

Полученные экспериментальные результаты, а также данные, полученные в результате ранее проведенных исследований [20, 27 - 30] позволили нам разработать экспериментальную установку для исследования магнитной дорожки. Её структурная схема представлена на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Структурная схема экспериментальной установки: 1 - источник питания; 2- соленоид; 3-прямоугольный сосуд; 4-вода; 5-немагнитный материал; 6-феррожидкостная ячейка; 7-корпус; 8 – лазер; 9-диафрагма; 10-линза; 11-фоточувствительный элемент; 12- поляризатор; 13-обрабатывающее устройство.

Магнитная жидкость (водный раствор наночастиц магнетита с концентрацией 0.03 – ПАВ – олеиновая кислота) размещается на подставке из немагнитного материала 5 в феррофлюидной ячейке 6. Ячейка размещается в магнитном поле соленоида 2. Индукция магнитного поля  $B_1$  в зоне размещения ячейки 6.8 мТ. Между соленоидом и феррофлюидной ячейкой расположен прямоугольный сосуд 3 с жидкой средой 4 (вода). По длине сосуда 3 перемещается тело 7, изготовленное из пермаллоя [34, 35]. Для регистрации отраженного лазерного излучения от спекл структур, используется разработанная нами система регистрации оптического изображения. На рисунке 3.а представлена регистрируемое изображение камерой 12 отраженного лазерного излучения от спекл структур, образованных наночастицами на силовых линиях магнитного поля соленоида.

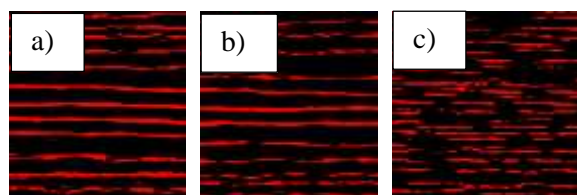


**Рисунок 3.** Дифракционная картина лазерного излучения в случае размещения магнитной жидкости: (а) в однородном магнитном поле; (б) силовые линии магнитного поля замкнуты на теле; (с) Прошло 2 минуты после замыкания всех силовых линий магнитного поля на теле.

При движении тела 7 по сосуду происходит замыкание силовых линий магнитного поля соленоида на 7. Агломераты, которые образовались в магнитном поле, под действием теплового движения начинают разрушаться, и регистрируемая спекл картина изменяется. На рисунке 3.b представлено изображение отраженного излучения от спекл картины наночастиц через  $t_3 = 20$  с после замыкания силовых линий магнитного поля соленоида на тело и при  $t_3 = 120$  с – рисунке 3.c. Значение  $t_3 = 120$  – это среднее время прохождения подвижного магнитного объекта через точку пространства на глубине в зоне формирования магнитной дорожки. Продольное время релаксации  $T_1$ , которое определяет процесс намагничивания вещества, для воды на глубине составляет значение менее 1 с. Для полного намагничивания жидкой среды необходимо время  $3T_1$  [8, 9, 13, 14].

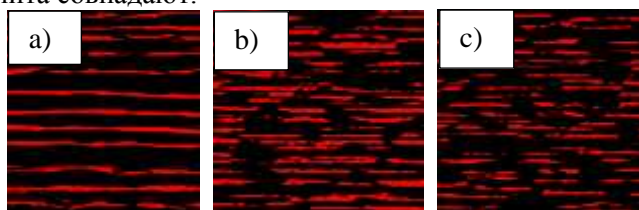
### 3. Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Необходимо отметить, что процесс формирования магнитной дорожки зависит, как от скорости движения, так и от величины индукции  $B_0$  магнитного поля подвижного объекта. На рисунке 4 в качестве примера представлены изображения отраженного излучения от спекл картины наночастиц через  $t_3 = 5$  с (рисунок 4.b) после замыкания силовых линий магнитного поля соленоида на тело и при  $t_3 = 30$  с – рисунок 4.c. Полученный результат изменения структуры регистрируемого оптического изображения, которое сформировалась от движения подвижного объекта из материала с низким значением  $B_0 = 153$  мкТл при атмосферном давлении подтверждает влияние скорости объекта на процесс формирования магнитной дорожки. При увеличении давления водного слоя и объема подвижного объекта данный процесс будет более ярко выражен.



**Рисунок 4.** Дифракционная картина лазерного излучения в случае размещения магнитной жидкости: (а) в однородном магнитном поле; (б) силовые линии магнитного поля замкнуты на теле; (с) Прошло 2 минуты после замыкания всех силовых линий магнитного поля на теле.

На рисунке 5 в качестве примера представлены изображения отраженного излучения от спекл картины наночастиц через  $t_3 = 5$  с (рисунок 5.b) после замыкания силовых линий магнитного поля соленоида на подвижный объект с индукцией  $B_0 = 1.7$  мТл (ранее использовался пермаллой), а также при  $t_3 = 30$  с – рисунок 5.c. В качестве подвижного объекта использовался магнит из сплава самарий-кобальт. Направление силовых линий магнитного поля соленоида и магнита совпадают.



**Рисунок 5.** Дифракционная картина лазерного излучения в случае размещения магнитной жидкости: (а) в однородном магнитном поле; (б) силовые линии магнитного поля замкнуты на теле; (с) Прошло 2 минуты после замыкания всех силовых линий магнитного поля на теле.

Анализ полученных результатов на рисунке 4 и 5 показывает изменение характера оптического изображения от спекл структур после замыкания силовых линий на магнитный объект. Процесс разрушения спекл структур зависит от скорости движения объекта во всех направлениях, регистрируемого изображения. Это показывает возможность регистрации изменения вариаций магнитного поля оптическим датчиком. Обработывая изображения с

разнесенных на одинаковые расстояния оптических датчиков, можно построить диаграммы изменения вариаций магнитного поля и установить наличие на глубине акватории магнитной дорожки.

#### 4. Заключение

Полученные результаты исследований позволили разработать устройство в виде квадратов со стороной 8-10 м в углах которых размещаются оптические датчики на основе феррофлюидных ячеек для обнаружения магнитной дорожки на глубине морской акватории. Данные экспериментов по обнаружению магнитной дорожки от подвижных магнитных объектов в специализированном бассейне с использованием разработанной системы датчиков были подтверждены измерениями, выполненными протонным погружным магнитометром.

Полученные результаты показали, что для определения время образования магнитной дорожки и направление движения магнитного объекта об амплитуде вариаций магнитного поля с учетом изменения их характера по объему дорожки более целесообразно использовать магнитометр. Чувствительности разработанных оптических датчиков в ряде случаев недостаточно для получения достоверного результата.

#### 5. Литература

- [1] D'yachenko, S.V. NMR studies of the sedimentation of ferromagnetic nanoparticles in a magnetic fluid / S.V. D'yachenko, I.S. Kondrashkova, A.I. Zhernovoi // *Technical Physics*. – 2017. – Vol. 62(1). – P. 1602-1604.
- [2] Дьяченко, С.В. Физико-механические свойства модельного материала с топологией трижды периодических поверхностей минимальной энергии типа гироид в форме куба / С.В. Дьяченко, Л.А. Лебедев, М.М. Сычев, Л.А. Нефедова // *Журнал технической физики*. – 2018. – Т. 85, № 7. – С. 1014-1017.
- [3] Kashaev, R.S. Effect of irradiation in the visual and infrared spectral regions on nuclear magnetic relaxation parameters of protons in oil products / R.S. Kashaev, E.G. Gazizov // *Journal of Applied Spectroscopy*. – 2010. – Vol. 77(3). – P. 321-328.
- [4] Alashkin, E.M. Spin Kinetics of Liquid  $^3\text{He}$  in Contact with a  $\text{DyF}_3$  Micropowder at Ferromagnetic Ordering of  $\text{Dy}^{3+}$  Ions / E.M. Alashkin, E.T. Kondratyeva, V.V. Kuzmin, K.R. Safullin, A.A. Stanislavovas, A.V. Savinkov, A.V. Klochkov, M.S. Tagirov // *JEPT Letters*. – 2018. – Vol. 107(2). – P. 111-117.
- [5] Filippov, A. Self-diffusion in a hyaluronic acid-albumin-water system as studied by NMR / A. Filippov, M. Artamonova, M. Rudakova, R. Gimatdinov, V. Skirda // *Magnetic Resonance in Chemistry*. – 2012. – Vol. 50(2). – P. 114-119.
- [6] Davydov, R.V. Computer modelling of pulsed laser femtosecond ablation for metals / R.V. Davydov, V.I. Antonov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1135(1). – P. 012087.
- [7] Petrov, A.A. Features of magnetic field stabilization in caesium atomic clock for satellite navigation system / A.A. Petrov, N.M. Grebenikova, N.A. Lukashev, V.V. Davydov, N.V. Ivanova, N.S. Rodugina, A.V. Moroz // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1038(1). – P. 012032.
- [8] Davydov, V.V. Formation of the Structure of NMR Signal from Condensed Medium in a Weak Magnetic Field / V.V. Davydov, N.S. Myazin, V.B. Fadeenko, S.E. Logunov // *Technical Physics Letters*. – 2018. – Vol. 44(2). – P. 153-156.
- [9] Marusina, M.Y. Design of a Gradient System for a Multiphase Flowmeter / M.Y. Marusina, B.A. Bazarov, P.A. Galaidin, M.P. Marusin, A.A. Silaev, E.Y. Zakemovskaya, Y.N. Mustaev // *Measurement Techniques*. – 2014. – Vol. 57(5). – P. 580-586.
- [10] Aleksandrov, E.B. Modern radio-optical methods in quantum magnetometry / E.B. Aleksandrov, A.K. Vershovskii // *Physics-Uspekhi*. – 2009. – Vol. 52(6). – P. 573-601.
- [11] Vershovskii, A.K. Micro-scale three-component quantum magnetometer based on nitrogen-vacancy color centers in diamond crystal / A.K. Vershovskii, A.K. Dmitriev // *Technical Physics Letters*. – 2015. – Vol. 41(4). – P. 393-396.

- [12] Logunov, S.E. Visualizer of magnetic fields / S.E. Logunov, A.Y. Koshkin, V.V. Davydov, A.A. Petrov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 741(1). – P. 012092.
- [13] Davydov, V.V. Nuclear-resonance magnetometer with a flowing liquid to measure weak fields / V.V. Davydov, V.I. Dudkin, A.Yu. Karseev // *Technical Physics*. – 2015. – Vol. 60(3). – P. 456-460.
- [14] Davydov, V.V. Method for Measuring the Sensitivity of Nuclear-Resonance Magnetometers with Flowing Liquid / V.V. Davydov, V.I. Dudkin, E.N. Velichko // *Measurement Techniques*. – 2016. – Vol. 59(2). – P. 176-182.
- [15] Podstrigaev, A.S. Features of the Development of Transceivers for Information and Communication Systems Considering the Distribution of Radar Operating Frequencies in the Frequency Range / A.S. Podstrigaev, A.V. Smolyakov, V.V. Davydov, N.S. Myazin, M.G. Slobodyan // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2018. – Vol. 11118 LNCS. – P. 509-515.
- [16] Фокин, Г.А. Позиционирование подвижных источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом / Г.А. Фокин, Ф.Х. Аль-Одхари // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. – 2017. – Т. 11, № 4. – С. 41-46.
- [17] Волобоев, В.П. Радиолокационная станция воздушного (морского) базирования, работающая в динамически сложных внешних условиях / В.П. Волобоев, В.П. Клименко, В.Д. Лосев // *Математическое машиностроение и системы*. – 2005. – № 4. – С. 131-142.
- [18] Davydov, R.V. Fiber-optic transmission system for the testing of active phased antenna arrays in electronic chamber / R.V. Davydov, I.V. Saveliev, V.A. Lenets, M.Yu. Tarasenko, T.R. Yalunina, V.V. Davydov, V.Yu. Rud // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2017. – Vol. 10531 LNCS. – P. 177-183.
- [19] Podstrigaev, A.S. Feature of transmission of intermediate frequency signals over fiber-optical communication system in radar station / A.S. Podstrigaev, R.V. Davydov, V.Yu. Rud, V.V. Davydov // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2018. – Vol. 11118 LNCS. – P. 624-630.
- [20] Logunov, S.E. Quantum analyzer of force lines structure at magnetic fields / S.E. Logunov, M.G. Vysocky, V.V. Davydov, A.Yu. Koshkin, V.Yu. Rud // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 917(5). – P. 052058.
- [21] Myazin, N.S. / Spectral characteristic of InP photocathode with a surface grid electrode // N.S. Myazin, K.J. Smirnov, V.V. Davydov, S.E. Logunov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 929(1). – P. 012080.
- [22] Borodulin, R.U. The principles of antennas constructive synthesis in dissipative media / R.U. Borodulin, B.V. Sosunov, S.B. Makarov // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2017. – Vol. 10531 LNCS. – P. 453-465.
- [23] Mashkov, G. A positioning accuracy experimental evaluation in SDR-based MLAT with joint processing on range measurement / G. Mashkov, E. Borisov, G. Fokin // *Proceedings – International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications*. – 2016. – Vol. 7849572. – P. 7-12.
- [24] Davydov, R.V. Monitoring of flowing media state by refraction phenomenon / R.V. Davydov, V.I. Antonov, A.V. Moroz // *Proceedings of the IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics*. – 2018. – Vol. 8564378. – P. 236-239.
- [25] Давыдов, В.В. Измерение магнитной восприимчивости и константы Кюри коллоидных растворов в феррофлюидных ячейках методом ядерного магнитного резонанса / В.В. Давыдов, Н.С. Мязин // *Измерительная техника*. – 2017. – № 5. – С. 55-59.
- [26] Davydov, R.V. Equation of state for computer simulation of metal ablation by femtosecond laser pulses / R.V. Davydov, V.I. Antonov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 929(1). – P. 012040.

- [27] Logunov, S.E. On the possibility of using the photometric method for monitoring the position of a mobile marine object / S.E. Logunov, V.V. Davydov, M.G. Vysoczky, O.A. Titova // Proceedings of the IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics. – 2018. – Vol. 8564402. – P. 282-284.
- [28] Logunov, S.E. Quantum autonomous magnetic field sensor / S.E. Logunov, A.Y. Koshkin, V.V. Davydov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1124(4). – P. 041025.
- [29] Logunov, S.E. New method of researches of the magnetic fields force lines structure / S.E. Logunov, V.V. Davydov, M.G. Vysocky, M.S. Mazing // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1038(1). – P. 012093.
- [30] Logunov, S.E. Peculiarities of registration of magnetic field variations by a quantum sensor based on a ferrofluid cell / S.E. Logunov, V.V. Davydov, M.G. Vysocky, O.A. Titova // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1135(1). – P. 012069.
- [31] Savchemko, E.A. Registration of fluorescence in biomolecular solutions using dynamic pin photodiode / E.A. Savchemko, E.K. Nepomnyashchaya, D.B. Dyubo, E.N. Velichko, O.Y. Tsybin // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 917(4). – P. 042010.
- [32] Nepomnyashchaya, E.K. Inverse problem of laser correlation spectroscopy for analysis of polydisperse solutions of nanoparticles / E.K. Nepomnyashchaya, E.N. Velichko, E.T. Aksenov // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 769(4). – P. 012025.
- [33] Давыдов, В.В. Измерение магнитной восприимчивости и константы Кюри коллоидных растворов в феррофлюидных ячейках методом ядерного магнитного резонанса / В.В. Давыдов, Н.С. Мязин // Измерительная техника. – 2017. – № 5. – С. 55-59.
- [34] Кузнецов, П.А. Композиционный материал для защиты от электромагнитного излучения / А.П. Кузнецов, Б.В. Фармаковский, А.Ю. Аскинази, Т.В. Песков, С.Б. Бибииков, Э.И. Куликовский, Я.В. Орлова // Патент на изобретение RUS 2324989 19.06, 2006.
- [35] Gorynin, I.V. III International scientific and engineering conference “Nanotechnologies of functional materials”: Additive technologies based on composite powder nanomaterials / I.V. Gorynin, A.S. Oryshchenko, V.A. Malyshevskii, B.V. Farmakovskii, P.A. Kuznetsov // Metal Science and Heat Treatment. – 2015. – Vol. 56(9-10). – P. 519-524.

## Development of an optical imaging system to study the parameters of a magnetic track from a moving object

S.E. Logunov<sup>1</sup>, V.V. Davydov<sup>1,2</sup>, N.S. Myazin<sup>1</sup>, V.Yu. Rud<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Politehnicheskaya street 29, Saint Petersburg, Russia, 195251

<sup>2</sup>All-Russian Research Institute of Phytopathology, Institut street 5, Bolshie Vyazemy, Russia, 143050

**Abstract.** The necessity of studying the magnetic track from a moving object is substantiated. An optical system has been developed to detect a magnetic track at sea depth from a moving magnetic object. A method of processing and decoding optical images formed using a ferrofluid cell and laser radiation is proposed. The results of experimental studies are presented.