

**Наговицин Александр Иванович** – РВиА МВАА; e-mail: alexander@nagovitsin.ru; Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88125421433 (сл.), 89112160000 (моб.); кафедра автоматизированного управления; к.в.н.; доцент.

**Молоткова Баира Борисовна** – e-mail: bbmolotkova@bk.ru; тел.: +79818035441; кафедра автоматизированного управления; к.п.н.; доцент.

**Nagovitsin Aleksandr Ivanovich** – RViA MVAА; e-mail: alexander@nagovitsin.ru; Sankt-Peterburg, Russia; phone: +78125421433 (sl.), 89112160000 (mob.); the department of automated control; cand. of milit. sc.; associate professor.

**Molotkova Baira Borisovna** – e-mail: alexander@nagovitsin.ru; phone: +79818035441; the department of automated control; cand. of ped. sc.; associate professor.

УДК 629.127.4, 623.958.2

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-59-72

**Н.А. Соколов, А.В. Рычков**

### **ПОВЫШЕНИЕ ПОИСКОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*В статье обосновывается актуальность решения задач поиска неразорвавшихся боеприпасов, а также археолого-геологических изысканий в акваториях внутренних вод и прибрежных зон Российской Федерации. На примерах выполнения работ по разминированию в акватории Балтийского моря и детального магнитометрического обследования акватории Фанатории показываются широкие возможности современной аппаратуры по локализации объектов, перекрытых донными отложениями и визуально незаметных на поверхности дна. Рассматриваются преимущества применения автономных необитаемых подводных аппаратов для метода поиска ферромагнитных предметов, основанного на регистрации пространственно распределенных магнитных аномалий. Показаны направления развития многоканальных магнитометрических средств поиска. Выявлены потенциальные возможности многоканальных магнитометрических систем по идентификации объектов поиска. На примере существующей технологии поиска водолазным способом показывается, что обеспечиваемый таким способом темп разведки является крайне низким даже при наиболее благоприятных условиях: наилучшей видимости, пологом склоне дна с твердым основанием. При этом время на разведку участка акватории водолазным способом вдоль одного берега составит около 5 часов в благоприятных условиях, а следовательно, такой способ не может применяться при обследовании больших акваторий. С учетом достигнутого на современном этапе уровня технологий для автоматизации подводных работ предлагается применять автономные необитаемые подводные аппараты с установленной в качестве целевой нагрузки многоканальной магнитометрической системой. Кроме автоматизации процесса выполнения задач, применение необитаемых подводных аппаратов позволит или полностью исключить, или существенно снизить опасное воздействие на человека мероприятий по поиску неразорвавшихся боеприпасов и вредных факторов глубоководных работ, а так же снизить материальные и временные затраты за счет сокращения операций по обслуживанию водолазного оборудования. Обработка результатов съемки и создание карты магнитных аномалий позволит выявить структуры, геомагнитные свойства которых заметно отличаются от естественного магнитного фона. Подобная методика позволяет значительно повысить информативность и достоверность результатов обследования акваторий, обеспечивая выявление визуально незаметных объектов, обладающих собственным магнитным полем. На основе теории электромагнитного поля и магнитостатики разработана методика расчетной оценки параметров и эффективности функционирования многоканальной магнитометрической системы для необитаемых подводных аппаратов. Методика предназначена для оценки параметров и возможностей по обнаружению ферромагнитных объектов и предварительной оценки эффективности ведения поиска. В качестве критерия (достижение*

положительного результата оценки параметров и эффективности функционирования многоканальной магнитометрической системы), в соответствии со Стандартами противоминной деятельности IMAS, принято условие: обнаружение объекта определенного типа на заданной глубине. Влияние вышеперечисленных данных на решение задачи оценивалось в результате имитационного компьютерного моделирования в программной среде системы автоматизированного проектирования MathCAD с дальнейшей визуализацией результатов.

*Поиск объектов в воде; подводный поиск; необитаемый подводный аппарат; целевая нагрузка; магнитометрическая целевая нагрузка; магнитометрическая система; магнитный момент; магнитная индукция.*

**N.A. Sokolov, A.V. Rychkov**

### **INCREASING THE SEARCH CAPABILITIES OF AUTONOMOUS UNINHABITED UNDERWATER VEHICLES THROUGH THE USE OF MULTI-CHANNEL MAGNETOMETRIC SYSTEMS**

*The article substantiates the relevance of solving the problems of searching for unexploded ordnance, as well as archaeological and geological surveys in the waters of inland waters and coastal zones of the Russian Federation. Using examples of mine clearance operations in the Baltic Sea and a detailed magnetometric survey of the Phanagoria water area, the extensive capabilities of modern equipment for localization of objects covered by bottom sediments and visually invisible on the bottom surface are shown. The advantages of using autonomous uninhabited underwater vehicles for the method of searching for ferromagnetic objects based on the registration of spatially distributed magnetic anomalies are considered. The directions of development of multichannel magnetometric search tools are shown. The potential capabilities of multichannel magnetometric systems for identifying search objects are revealed. Using the example of the existing technology of diving search, it is shown that the rate of exploration provided in this way is extremely low even under the most favorable conditions: the best visibility, a gentle slope of the bottom with a solid base. At the same time, the time for exploration of a section of the water area by diving along one shore will be about 5 hours in favorable conditions, and, therefore, this method cannot be used when examining large water areas. Taking into account the level of technology achieved at the present stage, it is proposed to use autonomous uninhabited underwater vehicles with a multi-channel magnetometric system installed as a target load for automating underwater operations. In addition to automating the process of performing tasks, the use of uninhabited underwater vehicles will either completely eliminate or significantly reduce the dangerous impact on humans of measures to search for unexploded ordnance and harmful factors of deep-sea operations, as well as reduce material and time costs by reducing operations for servicing diving equipment. Processing the survey results and creating a map of magnetic anomalies will allow you to identify structures whose geomagnetic properties are markedly different from the natural magnetic background. Such a technique can significantly increase the information content and reliability of the results of the survey of water areas, providing the identification of visually invisible objects that have their own magnetic field. Based on the theory of the electromagnetic field and magnetostatics, a method for calculating the parameters and efficiency of the multichannel magnetometric system for uninhabited underwater vehicles has been developed. The method is designed to evaluate the parameters and capabilities for detecting ferromagnetic objects and to make a preliminary assessment of the search efficiency. As a criterion (achieving a positive result of evaluating the parameters and efficiency of the multi-channel magnetometric system), in accordance with the IMAS Mine Action Standards, the following condition is accepted: detection of an object of a certain type at a given depth. The influence of the above data on the solution of the problem was evaluated as a result of computer simulation in the software environment of the computer-aided design system MathCAD with further visualization of the results.*

*Object search in water; underwater search; uninhabited underwater vehicle; target load; magnetometric target load; magnetometric system; magnetic moment; magnetic induction.*

**Введение.** Поиск неразорвавшихся боеприпасов (НВБ), а также археолого-геологические изыскания в акваториях внутренних вод и прибрежных зонах являются в настоящее время для Российской Федерации весьма насущными. По оцен-

кам специалистов, в первой половине XX века в акватории Балтийского моря было установлено свыше 130 000 морских мин, в том числе около 7 000 магнитных и около 4 000 магнитно-акустических [1].

За период с 1941 по 1945 гг. силами ВМФ было потоплено около 1 200 судов и кораблей противника, в том числе 581 боевой корабль, на борту которых находились штатный боезапас и вооружение, боеприпасы для снабжения сил армии и флота.

Значительные потери в войне на море понес и Советский флот. Всего за годы войн в акватории Балтийского моря потоплено свыше 1 500 боевых кораблей, около 1 600 торговых и пассажирских судов, около 100 подводных лодок, сбито несколько сотен самолетов, имеющих на борту десятки тысяч снарядов, мин, торпед, бомб.

Общее количество крупных затопленных объектов в российской части Финского залива достигает более 5 000 ед. [1].

Минная опасность в акватории Балтийского моря постепенно меняется вследствие проведения минно-тральных операций и влияния естественных факторов, к которым относятся обрыв минрепов якорных мин, «старение» взрывчатых веществ, разрушение материалов под воздействием морской среды (химическая, электрохимическая, биологическая коррозия), саморазряд источников электропитания мины.

Время, в течение которого корпус мины прокоррозирует до уровня, обеспечивающего его дальнейшее разрушение гидростатическим давлением, составляет для якорных мин 65–87 лет, для донных мин 105–140 лет.

По современным представлениям срок службы взрывчатого вещества (ВВ) при хранении его в условиях без попадания воды составляет 100 лет [1].

Надежных моделей поведения ВВ в условиях проникновения воды нет, поэтому мировая практика рекомендует считать их исправными и опасными, пока не доказано обратное.

Особую опасность представляют боеприпасы времен Первой мировой войны, снаряженные пироксилиновыми взрывчатыми веществами, чувствительность которых к механическому воздействию со временем увеличилась в несколько раз.

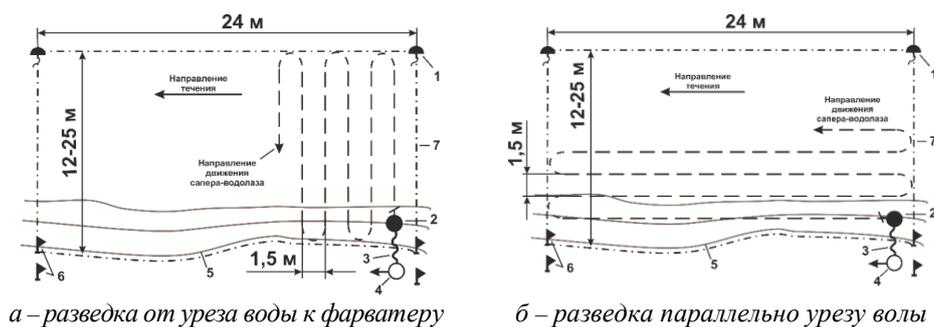
В части археолого-геологических изысканий пример подводных работ, проводившихся в акватории Таманского залива в период с 1999 по 2005 гг., показал, что затопленный культурный слой оказался перекрыт песчано-иловыми наносами в ходе многовековой абразии берегов Таманского залива. Это значительно снижает достоверность результатов визуального осмотра дна и высокочастотной гидролокации, так как искомые объекты в момент проведения исследования могут быть полностью укрыты донными отложениями. Дополнительные сложности для визуального и гидроакустического обследования создают значительная площадь затопленной части обследуемой территории (более 20 га) и густой покров водорослей [2].

С учетом вышеизложенного, в период с 2002 по 2003 гг. в Фанагории был испытан буксируемый морской цезиевый магнитометр Geometrics G-881, что позволило обнаружить ряд ферромагнитных объектов, затонувших во время Великой Отечественной войны, и три зоны площадных магнитных аномалий, идентифицировать которые не удалось. Следующий этап магнитометрических исследований состоялся в Фанагории в 2013 г. Для гидромагнитной разведки был избран полигон размерами 1300 × 300 м, общей площадью 48 га, с диапазоном глубин от 0,7 до 4,5 м. Примененный приборный комплекс состоял из буксируемого морского магнитометра Marine Magnetics SeaSpy; вариационной станции на базе протонного магнитометра ММП-203; феррозондового магнитометра Foerester Ferex [2].

Задачей работ стал не поиск отдельных магнитных аномалий, а создание детальной высокоточной карты магнитной съемки для всей обследованной акватории с минимальной погрешностью, что потенциально дает возможность выявить даже

относительно слабые аномалии, наиболее интересные как потенциально археологические объекты [3]. Гидромагнитная съемка велась с борта 6-метровой надувной моторной лодки на скорости 6–8 км/ч, продольными галсами с интервалом в 5 м, магнитометр Sea Spy буксировался в 15 м от лодки на глубине от 0,7 до 1,5 м [2].

В настоящее время мероприятия поиска опасных объектов и навигационных препятствий при проведении инженерной разведки акваторий выполняются инженерным разведывательным дозором (ИРД), в состав которого входит от 3 до 5 специалистов-водолазов [4]. При этом ИРД оснащен только одним водолажным индукционным металлоискателем. Поиск выполняется методом галсов, фактически без средств автоматизации работ (рис. 1).



а – разведка от уреза воды к фарватеру

б – разведка параллельно урезу воды

- 1 – буйки, обозначающие границы участка, 2 – сапер-водолаз с металлоискателем,  
3 – сигнальный конец, 4 – обеспечивающий водолаз, 5 – урез воды,  
6 – створные вехи на границах участка, 7 – граница участка

Рис. 1. Схема разведки прибрежного участка водолазом

Темп инженерной разведки таким способом не превышает  $120 \text{ м}^2/\text{ч}$ , целесообразно отметить, что это значение достижимо только при наиболее благоприятных условиях: наилучшей видимости, пологом склоне дна с твердым основанием. При этом время на разведку участка акватории водолажным способом вдоль одного берега составит около 5 часов в благоприятных условиях, а, следовательно, такой способ не может применяться при обследовании больших акваторий.

Опыт разминирования в акватории Балтийского моря и детального магнитометрического обследования акватории Фанагории наглядно продемонстрировал широкие возможности современной аппаратуры по локализации объектов, перекрытых донными отложениями и визуально незаметных на поверхности дна. Этот вид неразрушающего исследования, помимо обнаружения современных ферромагнитных объектов, способен выявить скопления керамики и камней, обладающие несвойственным для этого района уровнем намагниченности [2].

Обработка результатов съемки и создание карты магнитных аномалий позволили выявить структуры, геомагнитные свойства которых заметно отличаются от естественного магнитного фона. Подобная методика позволяет значительно повысить информативность и достоверность результатов обследования акваторий, обеспечивая выявление визуально незаметных объектов, обладающих собственным магнитным полем [3].

**Постановка задачи.** С учетом достигнутого на современном этапе уровня технологий эффективным средством автоматизации подводных работ считаются автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) [5]. Кроме автоматизации процесса выполнения задач, применение АНПА позволяет или полностью исключить, или существенно снизить опасное воздействие на человека мероприятий по

поиску НВБ и вредных факторов глубоководных работ, а так же снизить материальные и временные затраты за счет сокращения операций по обслуживанию водозлазного оборудования.

На АНПА, как правило, устанавливается полный комплекс систем и устройств, обеспечивающих самостоятельное движение под водой, большинство из них имеют торпедообразную форму, оснащены энергетической установкой, состоящей из литиевой аккумуляторной батареи и гребного электродвигателя (рис. 2).

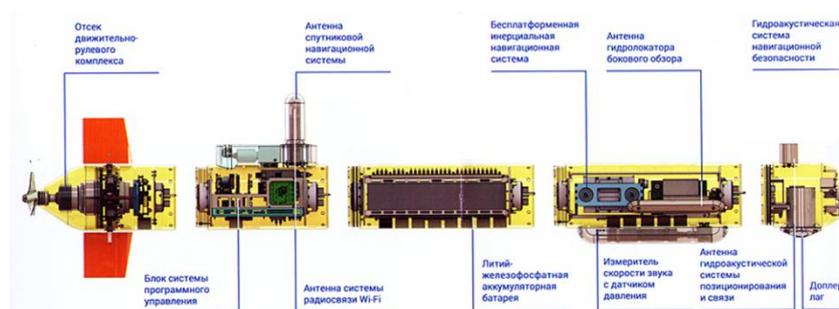


Рис. 2. Конструкция АНПА

Управление осуществляется автономно по программе, заложенной в память бортовой ЭВМ, с использованием инерционной навигационной системы, доплеровского лага и с периодическим уточнением местоположения по данным космической радионавигационной системы при подвсплытии [5].

В качестве базовых платформ для построения перспективного поискового комплекса могут быть взяты за основу разработки отечественных предприятий промышленности. Так, например, ЦКБ «Рубин» (г. Санкт-Петербург) разрабатывается серия мобильных комплексов с АНПА «Амулет» и «Талисман» [6], обеспечивающих решение широкого круга поисковых и исследовательских задач, в том числе в условиях мелководья (рис. 3).

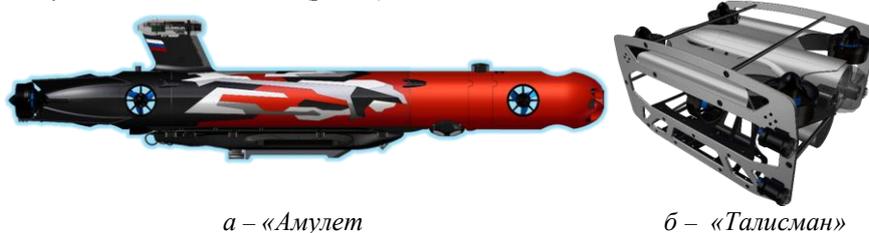


Рис. 3. Общий вид АНПА, разрабатываемых ЦКБ «Рубин»

Технические характеристики АНПА ЦКБ «Рубин»: максимальная скорость подводного хода до 1,5 м/с, рабочая глубина погружения до 50 м [7, 8].

В качестве целевой нагрузки для АНПА с учетом опыта выполнения поисковых задач по обнаружению и идентификации большинства типов ферромагнитных объектов, ведения гидромагнитной разведки и сбора магнитографической информации необходимо применить многоканальную магнитометрическую сенсорную систему, состоящую из нескольких чувствительных элементов (ЧЭ), пространственно расположенных по принципу градиентометра.

Чтобы повысить точность измерений необходимо одновременно регистрировать сигналы с нескольких, не менее трех, ЧЭ, закрепленных на единой «жесткой» конструкции, раме АНПА, расположенных рядом на некотором расстоянии друг

от друга перпендикулярно траектории движения. Дополнительным преимуществом такой системы является увеличение ширины зоны поиска вдоль направления движения, обеспечивая пропорциональное увеличение темпа ведения разведки и сокращение времени поиска (рис. 4).

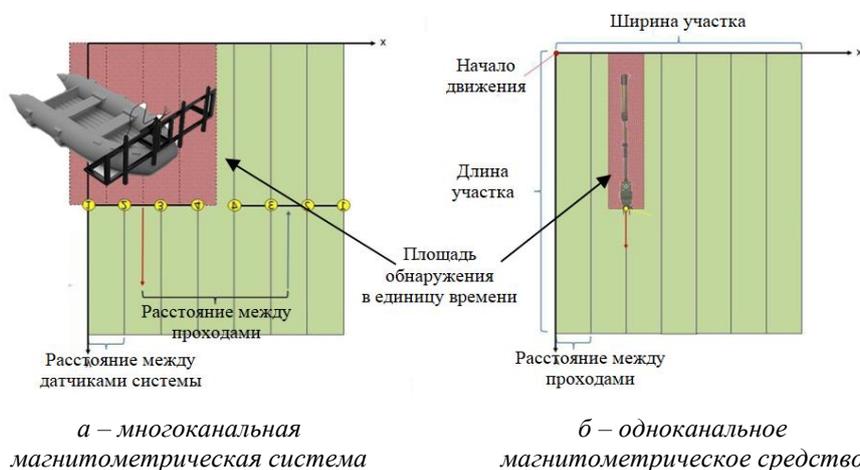


Рис. 4. Зависимость темпа поиска от количества каналов магнитометрического средства

**Текущее направление исследований.** В настоящее время большинство поисковых магнитометрических средств обнаружения являются, по сути, только индикаторами наличия потенциальных объектов в локализованной двухмерной области пространства. Имеются изделия, частично и с определенными ограничениями решающие задачи определения координат для специфических объектов. Известны теоретические работы, посвященные определению координат объекта с высокой точностью при неподвижной приемной антенне. Известные решения имеют ряд ограничений в технической реализации, что сужает их практическую применимость [9–11].

На основе теории электромагнитного поля и магнитостатики разработана методика расчетной оценки параметров и эффективности функционирования многоканальной магнитометрической системы (ММС) [12]. Методика предназначена для оценки параметров и возможностей по обнаружению ферромагнитных объектов и предварительной оценки эффективности ведения поиска.

В качестве критерия (достижение положительного результата оценки оптимальных параметров и эффективности функционирования ММС), в соответствии со Стандартами противоминной деятельности IMAS, принято условие: обнаружение объекта определенного типа на заданной глубине.

Влияние вышеперечисленных данных на решение задачи оценивалось в результате имитационного компьютерного моделирования в программной среде системы автоматизированного проектирования MathCAD с дальнейшей визуализацией результатов [13].

Оценка параметров и эффективности функционирования ММС проводится в несколько этапов:

- ◆ на первом этапе проводится первичное получение и обработка данных по магнитной индукции сигналов для каждого чувствительного элемента магнитометра;
- ◆ на следующем этапе проводится системная оценка и построение магнитуд полезных сигналов, расчет глубины залегания и магнитного момента объекта поиска;

♦ далее проводится оценка плотности распределения вероятности распознавания объекта поиска по его магнитному моменту и принимается решение о соответствии расчетных данных объекту поиска.

Структурно-логическая схема методики представлена на рис. 5.

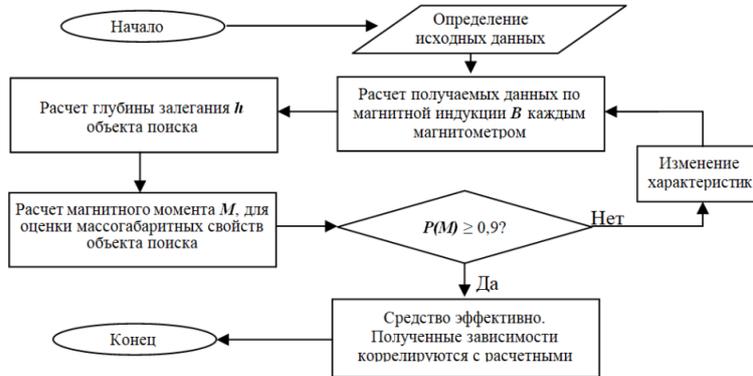


Рис. 5. Структурно-логическая схема методики расчетной оценки ММС

Исходя из критерия надежного обнаружения ММС объекта поиска в соответствии с разработанной расчетной методикой возможно определить требования к конструкции ММС, а именно:

- ♦ определить величину  $r$  – расстояния между соседними чувствительными элементами;
- ♦ определить значение базы  $l$  – расстояния между магнитометрическими датчиками в чувствительном элементе.

Применяя функции множественного регрессивного анализа, обрабатывались 180 реализаций (магнитуд) моделируемых сигналов, варьировались 6 вариаций значений базы чувствительного элемента  $l$  в диапазоне от 0,4 до 1,5 м, и 10 значений расстояний между чувствительными элементами в диапазоне от 0 до 1 м, для 3 типовых объектов поиска с известным значением магнитного момента  $M = (0,1; 1,8; 50 \text{ Ам}^2)$ .

Для типовой окружающей обстановки (эквивалентный шум не более 2...3 нТл), возможна реализация порога обнаружения  $(dB/dr)_{\min} = 10 \text{ нТл/м}$  [14, 15].

$$B_{\text{порог}}(l, r) = \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \dots \\ l_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \dots \\ r_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \dots \\ M_3 \end{pmatrix} \rightarrow \min. \quad (1)$$

Результаты анализа сведены в графики, показанные на рис. 6.

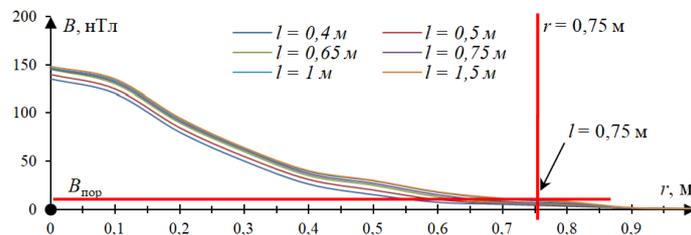


Рис. 6. Зависимость амплитуды регистрируемого сигнала от топологии расположения магнитометрических датчиков ( $l$  – база ЧЭ,  $r$  – расстояние между ЧЭ)

Из графиков следует, что с учетом среднего (типового) шума трассы и надежного обнаружения на уровне порога чувствительности (превышение сигнала над порогом не менее 4 дБ) [14] выбирается радиус обнаружения в плане для чувствительного элемента в соответствии с описанной в расчетной методике схемой функционирования ММС (рис. 6):  $r = 0,75 \text{ м}$ .

Так же из результатов анализа моделирования следует, что величина базы чувствительного элемента оказывает влияние на величину полезных сигналов, начиная только с глубины залегания диполя  $h \geq 3l$ . Поэтому увеличение  $l$  является одним из способов создания чувствительных градиентометров типа Ferex 4.032 с чувствительным модулем CON160 (база 1,6 м) и Vallon VET2 (база 1,7 м) [16–19]. Однако их эксплуатация на скорости около 1 м/с и более затруднительна.

Исходя из результатов расчета амплитуд сигналов по выражению (1) при варьировании базы в пределах  $l = 0,4 \dots 1,5 \text{ м}$ , применяемых в известных зарубежных изделиях, сделан выбор  $l = 0,75 \text{ м}$ , т.е. величина базы равна расстоянию между чувствительными элементами в ММС.

По определенным параметрам базы и расстояния между соседними чувствительными элементами в соответствии с расчетной методикой предложена модель технического облика ММС для размещения в качестве целевой нагрузки АНПА (рис. 7).



Рис. 7. Модель технического облика ММС для АНПА

Проведенные компьютерные и натурные экспериментальные исследования предложенного метода анализа и обработки данных в макете ММС, разработанного в соответствии с предложенной конструкцией (рис. 8), показали возможность построения карты магнитных аномалий с последующей оценкой ориентации и глубины залегания в грунте объектов поиска [20].

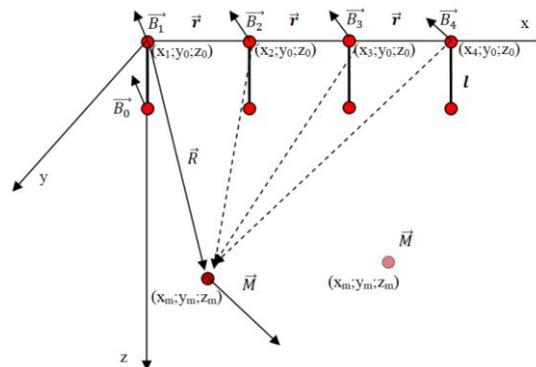


Рис. 8. Схема функционирования ММС



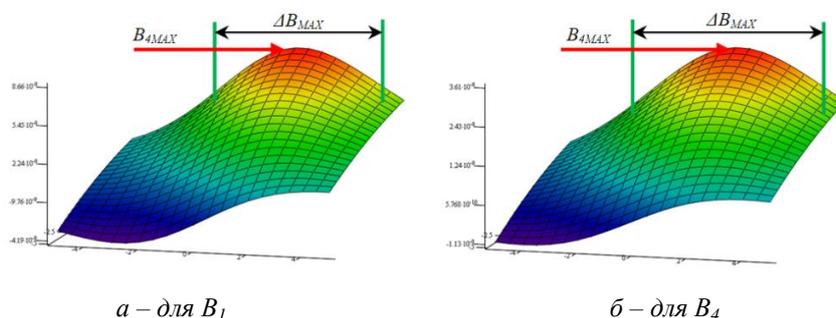


Рис. 12. Модель зависимости магнитуд сигналов от глубины обнаружения  $h = 3$  м для случая обнаружение 500 кг фугасной бомбы

Анализ графиков (рис. 9–12) показывает, что изменение глубины обнаружения и ориентации объекта поиска существенно изменяет не только форму (магнитуду), но и амплитуду полезного сигнала. Зависимости магнитуд  $V_1$ ,  $V_4$ , от расстояния до объекта поиска весьма велики, особенно в сравнении относительно малых  $h \leq 1,5 \dots 3$  и больших глубин  $h \geq 5$ .

Из графиков видно, что чем меньше глубина расположения диполя  $h$ , тем резче спадает амплитуда сигнала по магнитной индукции  $B$ .

Таким образом, результаты компьютерного моделирования сигналов в многоканальном магнитометрическом бомбоискателе подтвердили возможность построения с помощью программы обработки сигналов карты магнитных аномалий для оценки не только глубины залегания взрывоопасного предмета, но и характера ориентации объекта поиска в грунте.

«Идеальный» магнитный момент  $M$ , который характеризует объект поиска, приложен в точке, у него нет полюсов, так как они условно слиты. Реальные объекты поиска, в том числе взрывоопасные предметы, имеют полюса – положительный, откуда силовые линии выходят, и отрицательный, куда силовые линии входят, здесь концентрация силовых линий максимальная (рис. 13) [22].

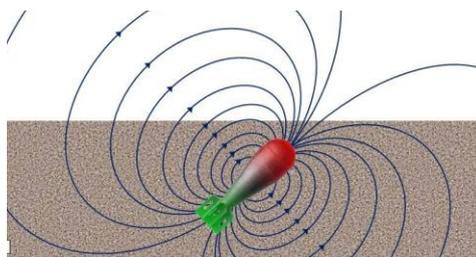


Рис. 13. Условная полярность объекта поиска

Следовательно, вблизи этих точек магнитная индукция также максимальная, что и должно выявляться по карте магнитных аномалий. Если на карте выявляется только один полюс, это значит, что предмет расположен вертикально и второй полюс (невидимый) находится под первым.

Для подтверждения данных компьютерного моделирования проведены экспериментальные исследования макета ММС на суше, результаты экспериментальных исследований зависимости полученных магнитограмм реальных объектов (формы сигнала) от их типа показаны на рис. 14–16.

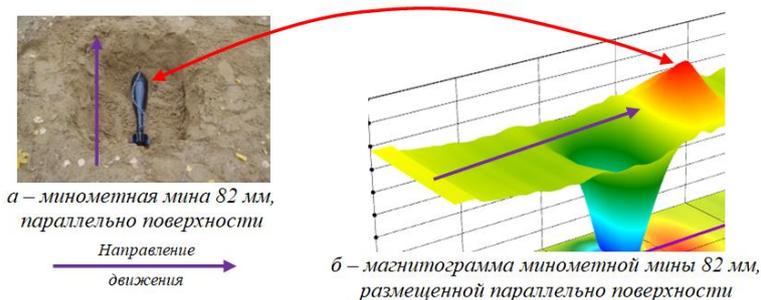


Рис. 14. Зависимость формы магнитограммы объекта от его типа и ориентации

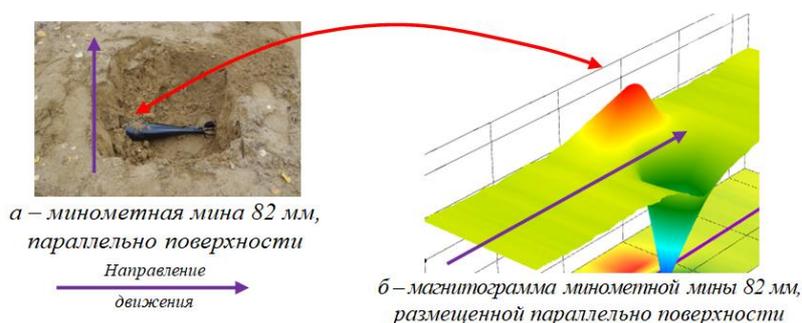


Рис. 15. Зависимость формы магнитограммы объекта от его типа и ориентации

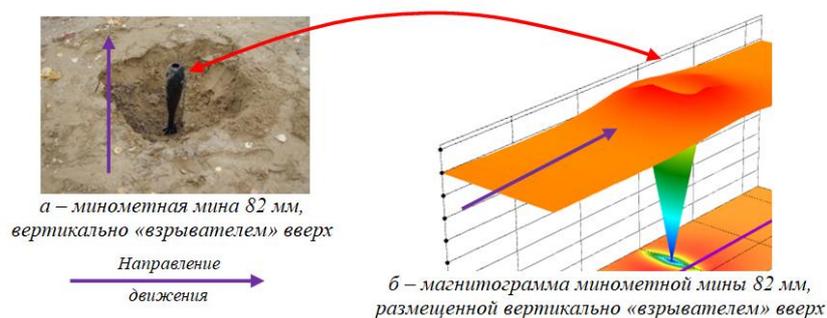


Рис. 16. Зависимость формы магнитограммы объекта от его типа и ориентации

Как видно из рисунков 14–16, форма магнитограмм объектов поиска зависит не только от типа, но и от ориентации объекта относительно поверхности. Эта зависимость позволяет распознавать (идентифицировать) объекты поиска, определять их ориентацию и глубину залегания.

**Заключение.** Таким образом, опыт проведения подводных поисковых работ в акватории Балтийского моря и Таманского залива показывает, что создание детальной высокоточной карты магнитной съемки для всей обследованной акватории с минимальной погрешностью потенциально дает возможность выявить даже относительно слабые аномалии, наиболее интересные как потенциально объекты поиска даже в неблагоприятных условиях разведки, когда затопленные объекты перекрыты песчано-иловыми наносами, что значительно снижает достоверность результатов визуального осмотра дна и высокочастотной гидролокации, так как искомые объекты могут быть полностью укрыты донными отложениями.

Потому применение АНПА для решения задач поиска НВБ и археолого-геологических изысканий в акваториях прибрежных зон, оснащенных в качестве целевой нагрузки предложенной ММС, будет обладать рядом преимуществ перед существующими изделиями и применяемыми в настоящее время методами поиска, а именно: возможностью распознавания типа объекта, прогнозирование его ориентации и глубины залегания в грунте; по сравнению с работой водолаза и применением одиночного магнитометра более высоким темпом разведки до  $16\ 000\ \text{м}^2/\text{ч}$  при скорости движения АНПА не менее  $1,5\ \text{м/с}$ .

Кроме того, применение АНПА позволяет или полностью исключить, или существенно снизить опасное воздействие на человека мероприятий по поиску НВБ и вредных факторов глубоководных работ, а так же снизить материальные и временные затраты за счет сокращения операций по обслуживанию водолазного оборудования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Добротворский А.Н., Бочкарев Е.Н., Никишов В.Н.* Методы оценки риска убытков от повреждения минами и взрывоопасными объектами при строительстве подводных нефтегазопроводов // Современное состояние и проблемы навигации и океанографии (НО-2004): Сб. науч. трудов. – СПб., 2004. – Т. 2. – С. 256-265.
2. *Ольховский С.В., Степанов А.В.* Магнитометрические разведки в акватории Фанагории // Вопросы подводной археологии. – 2013. – № 1. – С. 53-58.
3. *Соколов Н.А.* Применение магнитометрических датчиков при поиске взрывоопасных предметов с беспилотных воздушных носителей // Сб. материалов XIV Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и X молодежной школы семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 152-160.
4. Руководство по водолажным работам в сухопутных войсках. Ч. 1. – М.: Военное издательство, 2007. – 224 с.
5. Робототехника. – <http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/>.
6. Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин». – [http://ckb-rubin.ru/ckb\\_mt\\_rubin/](http://ckb-rubin.ru/ckb_mt_rubin/).
7. Необитаемый подводный аппарат «Амулет». – [http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/apra\\_amulet/](http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/apra_amulet/).
8. Необитаемый подводный аппарат «Талисман». – [http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/tpa\\_talisman/](http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/tpa_talisman/).
9. *Арбузов О.И.* Магниточувствительные поисковые приборы // Специальная техника. – 2000. – № 6. – С. 18-24.
10. *Щербаков Г.Н., Анцелевич М.А., Удинцев Д.Н., и др.* Применение магнитной томографии в проходных металлодетекторах // Специальная техника. – 2007. – № 6. – С. 38-40.
11. *Щербаков Г.Н., Анцелевич М.А., Удинцев Д.Н.* Оценка предельной глубины обнаружения ферромагнитных объектов искусственного происхождения в толще полупроводящей среды // Специальная техника. – 2004. – № 2. – С. 38-40.
12. *Афанасьев Ю.В.* Феррозондовые приборы. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 187 с.
13. Mathcad Resources. – <https://www.mathcad.com/ru>.
14. Магниторазведка. Справочник геофизика / под ред. В.Е. Никитского, Ю.С. Глабовского. – М.: Недра, 1980.
15. *Никольский В.В.* Теория электромагнитного поля. – М.: Высшая школа, 1961.
16. Humanitarian mine clearance. – <https://ebingergroup.de/en/products/humanitarian-mine-clearance/>.
17. МБИ-П. Техническое описание и инструкция по эксплуатации БИВР.411172.001ТО. – 71 с.
18. Ferex 4.032. Technical description. Foerster Institute Dr.Foerster. Edition 09/2000. – 16 p.
19. Модульный УХО-детектор-комплект для применения в скважинах и под водой. – <https://www.vallon.de/ru/magnetometer>.

20. Соколов Н.А. Многоканальная магнитометрическая система для разминирования больших территорий // Сб. материалов XV Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и XI молодежной школы семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. – С. 214-220.
21. Алексеев Е.Р., Чеснокова О.В. Решение задач вычислительной математики в пакетах Mathcad 12, MATLAB 7, Maple 9. – М.: НТ Пресс, 2006.
22. Звездинский С.С., Парфенцев И.В. Метод магнитометрического обнаружения взрывоопасных предметов // Специальная техника. – 2008. – № 2. – С. 8-17.

#### REFERENCES

1. Dobrotvorskiy A.N., Bochkarev E.N., Nikishov V.N. Metody otsenki riska ubytkov ot povrezhdeniya minami i vzyvooopasnymi ob"ektami pri stroitel'stve podvodnykh neftegazoprovodov [Methods for assessing the risk of losses from damage by mines and explosive objects in the construction of underwater oil and gas pipelines], *Sovremennoe sostoyanie i problemy navigatsii i okeanografii (NO-2004): Sb. nauch. trudov* [The current state and problems of navigation and oceanography (NO-2004): Collection of scientific papers]. Saint Petersburg, 2004, Vol. 2, pp. 256-265.
2. Ol'khovskiy S.V., Stepanov A.V. Magnitometricheskie razvedki v akvatorii Fanagorii [Magnetometric surveys in the waters of Phanagoria], *Voprosy podvodnoy arkhologii* [Questions of underwater archeology], 2013, No. 1, pp. 53-58.
3. Sokolov N.A. Primenenie magnitometricheskikh datchikov pri poiske vzyvooopasnykh predmetov s bespilotnykh vozdushnykh nositeley [Application of magnetometric sensors in the search for explosive objects from unmanned aerial vehicles], *Sb. materialov XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya» i X molodezhnoy shkoly seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [Collection of materials of the XIV All-Russian Scientific and Practical Conference "Perspective Systems and Management Tasks" and the X Youth School Seminar "Management and Information Processing in Technical Systems"]. Rostov-on-Donu Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, pp. 152-160.
4. Rukovodstvo po vodolaznym rabotam v sukhoputnykh voyskakh [Manual on diving operations in the land forces]. Part 1. – Moscow: Voennoe izdatel'stvo, 2007, 224 p.
5. Robototekhnika [Robotics]. Available at: <http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/>.
6. Tsentral'noe konstruktorskoe byuro morskoy tekhniki «Rubin» [Central Design Bureau of Marine equipment "Rubin"]. Available at: [http://ckb-rubin.ru/ckb\\_mt\\_rubin/](http://ckb-rubin.ru/ckb_mt_rubin/).
7. Neobitaemy podvodnyy apparat «Amulet» [Uninhabited underwater vehicle "Amulet"]. Available at: [http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/anpa\\_amulet/](http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/anpa_amulet/).
8. Neobitaemy podvodnyy apparat «Talisman» [Uninhabited underwater vehicle "Talisman"]. Available at: [http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/tnpa\\_talisman/](http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/tnpa_talisman/).
9. Arbutov O.I. Magnitochuvstvitel'nye poiskovye pribory [Magnetosensitive search devices], *Spetsial'naya tekhnika* [Special equipment], 2000, No. 6, pp. 18-24.
10. Shcherbakov G.N., Antselevich M.A., Udintsev D.N., i dr. Primenenie magnitnoy tomografii v prokhodnykh metallodetektorakh [Application of magnetic tomography in pass-through metal detectors], *Spetsial'naya tekhnika* [Special technique], 2007, No. 6, pp. 38-40.
11. Shcherbakov G.N., Antselevich M.A., Udintsev D.N. Otsenka predel'noy glubiny obnaruzheniya ferromagnitnykh ob"ektov iskusstvennogo proiskhozhdeniya v tolshche poluprovodnyashchey sredy [Estimation of the maximum depth of detection of ferromagnetic objects of artificial origin in the thickness of a semi-conducting medium], *Spetsial'naya tekhnika* [Special equipment], 2004, No. 2, pp. 38-40.
12. Afanas'ev Yu.V. Ferrozondovye pribory [Ferrosonde devices]. Leningrad: Energoatomizdat, 1986, 187 p.
13. Mathcad Resources. Available at: <https://www.mathcad.com/ru>.
14. Magnitorazvedka. Spravochnik geofizika [Magnetic exploration. Handbook of geophysics], ed. by V.E. Nikitskogo, Yu.S. Glabovskogo. Moscow: Nedra, 1980.
15. Nikol'skiy V.V. Teoriya elektromagnitnogo polya [Theory of the electromagnetic field]. Moscow: Vysshaya shkola, 1961.
16. Humanitarian mine clearance. Available at: <https://ebingergroup.de/en/products/humanitarian-mine-clearance/>.

17. MBI-P. Tekhnicheskoe opisaniye i instruksiya po ekspluatatsii BIVR.411172.001TO [MBI-P. Technical description and operating instructions BIVR. 411172. 001 TO], 71 p.
18. Ferex 4.032. Technical description. Foerster Institute Dr.Foerster. Edition 09/2000, 16 p.
19. Modul'nyy UXO-detektor-komplekt dlya primeneniya v skvazhinakh i pod vodoy [Modular UXO detector-kit for use in wells and under water]. Available at: <https://www.vallon.de/ru/magnetometer>.
20. Sokolov N.A. Mnogokanal'naya magnitometricheskaya sistema dlya razminirovaniya bol'shikh territoriy [Multichannel magnetometric system for mine clearance of large territories], *Sb. materialov XV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya» i XI molodezhnoy shkoly seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [Collection of materials of the XV All-Russian Scientific and practical Conference "Perspective Systems and Management Tasks" and the XI Youth School Seminar "Management and Information Processing in Technical Systems"]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2020, pp. 214-220.
21. Alekseev E.R., Chesnokova O.V. Reshenie zadach vychislitel'noy matematiki v paketakh Mathcad 12, MATLAB 7, Maple 9 [Solving problems of computational mathematics in packages Mathcad 12, MATLAB 7, Maple 9]. Moscow: NT Press, 2006.
22. Zvezhinskiy S.S., Parfentsev I.V. Metod magnitometricheskogo obnaruzheniya vzryvoopasnykh predmetov [Method of magnetometric detection of explosive objects], *Spetsial'naya tekhnika* [Special technique], 2008, No. 2, pp. 8-17.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.С. Звездинский.

**Соколов Николай Александрович** – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский испытательный институт инженерных войск» Минобороны России; e-mail: [cniii\\_iv@mail.ru](mailto:cniii_iv@mail.ru); 143432, Московская обл., Нахабино, Россия; тел.: 89163658920.

**Рычков Андрей Владимирович** – Военный учебно-научный центр Сухопутных войск «Общевойсковая ордена Жукова академия Вооруженных Сил Российской Федерации»; e-mail: [cniii\\_iv@mail.ru](mailto:cniii_iv@mail.ru); г. Москва, Россия; тел.: 84997665759; д.т.н.; доцент.

**Sokolov Nikolay Aleksandrovich** – Federal State Budgetary Institution "Central Research and Testing Institute of Engineering Troops" of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: [cniii\\_iv@mail.ru](mailto:cniii_iv@mail.ru); Nakhabino, Moscow Region, Russia; phone: +79163658920.

**Rychkov Andrey Vladimirovich** – Military Training and Research Center of the Land Forces "Combined Arms Order of Zhukov Academy of the Armed Forces of the Russian Federation"; e-mail: [cniii\\_iv@mail.ru](mailto:cniii_iv@mail.ru); Moscow, Russia; phone: +74997665759; dr. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.883

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-72-81

**В.Д. Сытенький, И.И. Маркович, Е.Е. Завтур**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПАССИВНЫХ РЛС АМПЛИТУДНЫМ МЕТОДОМ**

*Рассматривается амплитудный метод определения координат источников излучения в пассивной радиолокации. Синтезирован алгоритм вычисления координат источников излучения в пассивном режиме радиолокационных станций, основанный на приёме закономерно затухающих в пространстве электромагнитных колебаний антеннами в коллинеарном расположении. Необходимые для определения координат цели математические соотношения получены путем решения соответствующих треугольников, образованных базами антенн и целью. Это позволило определить местоположение источника излучения (цели) точкой пересечения гипербол с фокусами в местах расположения приёмных антенн. Приведены аналитические выражения для определения координат целей в декартовых и полярных системах координатах. Анализ погрешности предлагаемого алгоритма осуществлён с*