

Многоканальная магнитометрическая система для повышения поисковых возможностей автономных необитаемых подводных аппаратов

СОКОЛОВ Н.А.

ФГБУ «ЦНИИИ ИВ» Минобороны России, Нахабино, Московская обл., Россия

РЫЧКОВ А.В., ЩЕРБАКОВ Г.Н.

ВУНЦ СВ «ОВА ВС РФ», Москва, Россия

ЕФРЕМОВ И.А.

НПО «Специальная техника и связь» МВД России, Москва, Россия

Рассмотрены преимущества автономных необитаемых подводных аппаратов при поиске 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. Обработка результатов съемки и создание карты магнитных аномалий позволит выявить структуры, геомагнитные свойства которых заметно отличаются от естественного магнитного фона. Такой подход позволяет значительно повысить информативность и достоверность результатов обследования акваторий и выявить визуально незаметные объекты, обладающие 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. Результаты компьютерного моделирования сигналов многоканальной магнитометрической системы подтвердили возможность построения карты магнитных аномалий для оценки глубины залегания и характера расположения объекта поиска в грунте. Форма магнитограмм объектов поиска зависит не только от типа, но и от ориентации объекта относительно поверхности. Данная зависимость позволяет распознавать объекты поиска, определять их ориентацию и глубину залегания.

Ключевые слова: поиск объектов в воде, подводный поиск, необитаемый подводный аппарат, целевая нагрузка, магнитометрическая целевая нагрузка, магнитометрическая система, магнитный момент, магнитная индукция

В наше время актуальными остаются задачи поиска неразорвавшихся взрывоопасных боеприпасов (НВБ), а также археолого-геологические изыскания в акваториях внутренних вод и прибрежных зон. Общее количество крупных затопленных объектов в российской части Финского залива достигает более 5000 ед. [1]. Несмотря на то, что минная обстановка в акватории Балтийского моря постоянно меняется вследствие проведения минно-тральных операций и влияния естественных факторов, к которым относятся «старение» взрывчатых веществ (ВВ), разрушение материалов под воздействием морской среды, саморазряд источников электропитания мин, надежных моделей поведения ВВ в условиях проникновения воды нет, поэтому мировая практика рекомендует считать их исправными и опасными, пока не доказано обратное.

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 ВВ при хранении его в условиях без попадания воды составляет 100 лет [2].

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 из-за многовековой абразии берегов перекрыт песчано-иловыми наносами. Это значительно снижает достоверность результатов визуального осмотра дна и 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 и густой покров водорослей [3].

С учетом данных трудностей, 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. Примененный приборный комплекс состоял из буксируемого морского магнитометра *Marine Magnetics SeaSpy*; вариационной станции на базе протонного магнитометра ММП-203; феррозондового магнитометра *Foerester Ferex* [2].

Гидромагнитная съемка велась с борта 6-метровой надувной моторной лодки на скорости 6–8 км/ч, продольными галсами с интервалом в 5 м, магнитометр *SeaSpy* буксировался в 15 м от лодки на глубине от 0,7 до 1,5 м [3].

Опыт разминирования в акватории Балтийского моря и 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 техногенных ферромагнитных объектов в воде, способен выявлять скопления керамики и каменных сооружений, обладающих несвойственным для данного района уровнем намагниченности [4].

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.

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 также снизить материальные и временные затраты за счет сокращения операций по обслуживанию водолазного оборудования [6].

Как правило, на АНПА 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. 1).

Управление АНПА 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 всплытии [7].

В качестве базовых платформ для построения перспективного поискового комплекса могут быть взяты за основу разработки отечественных предприятий промышленности. Так ЦКБ «Рубин» (Санкт-Петербург) разрабатывается серия мобильных комплексов с АНПА «Амулет» и «Талисман» [7], обеспечивающих решение широкого круга поисковых и исследовательских задач, в том числе в условиях мелководья (рис. 2).

Технические характеристики АНПА ЦКБ «Рубин»: максимальная скорость подводного хода – до 1,5 м/с; рабочая глубина погружения – до 50 м [8,9].

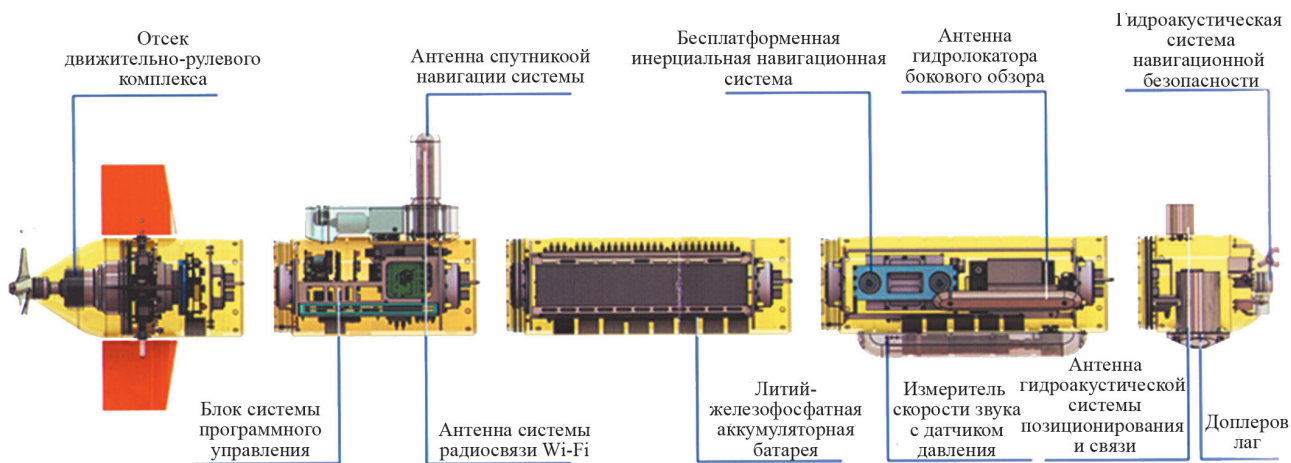


Рис. 1. Конструкция автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА)

Fig. 1. Autonomous Uninhabited Underwater Vehicle (AUUV) design

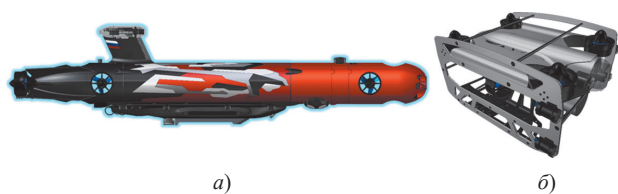


Рис. 2. Общий вид АНПА, разрабатываемых ЦКБ «Рубин»: а – «Амулет»; б – «Талисман»

Fig. 2. General view of AUUV developed by the Central Design Bureau «Rubin»: а – «Amulet»; б – «Talisman»

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), 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, обеспечивающее пропорциональное увеличение темпа ведения разведки и сокращение времени поиска (рис. 3).

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 [10, 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 достижения положительного результата оценки рациональных параметров ММС в соответствии со Стандартами противоминной деятельности IMAS принято условие: обнаружение объекта определенного типа на заданной глубине [13].

Влияние вышеперечисленных данных на решение задачи оценивалось в результате имитационного компьютерного моделирования в программной среде *MathCAD* с дальнейшей визуализацией результатов [14].

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 маг-

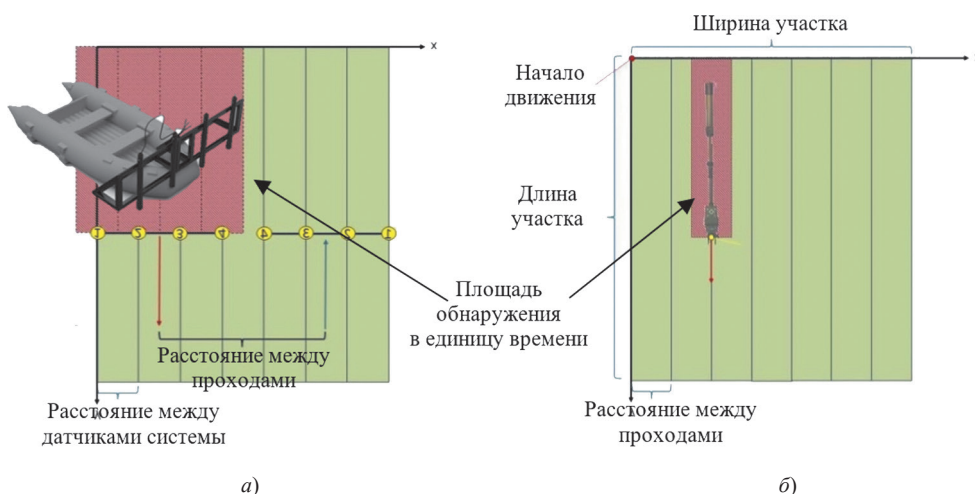


Рис. 3. Зависимость темпа поиска от количества ЧЭ магнитометрического средства: а – многоканальная магнитометрическая система; б – одноканальное магнитометрическое средство

Fig. 3. Dependence of the search rate on the number of sensitive elements of the magnetometric tool: а – multi-channel magnetometric system (MMS); б – single-channel magnetometric means

нитному моменту и принимается решение о соответствии расчетных данных объекту поиска.

Структурно-логическая схема методики представлена на рис. 4.

Исходя из критерия надежного обнаружения ММС объекта поиска по разработанной методике можно определить требования к конструкции ММС, а именно: значение r (расстояния между соседними ЧЭ); значение базы l (расстояния между магнитометрическими датчиками в ЧЭ).

Применяя функции множественного регрессивного анализа, обрабатывались 180 реализаций (магнитуд) моделируемых сигналов, варьировались 6 вариаций значений базы ЧЭ l в диапазоне от 0,4 до 1,5 м и 10 значений расстояний между ЧЭ 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 $(dB/dr)_{\min} = 10 \text{ нТл/м}$ [15]:

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

Результаты анализа показаны на рис. 5.

Из графиков (рис. 5) следует, что с учетом среднего (типového) шума трассы и надежного обнаружения на уровне порога чувствительности (превышение сигнала над порогом не менее 4 дБ) выбирается радиус обнаружения в плане для ЧЭ в соответствии с описанной в расчетной методике схемой функционирования ММС (рис. 6): $r = 0,75 \text{ м}$.

Также из результатов анализа моделирования следует, что величина базы ЧЭ 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, 17].

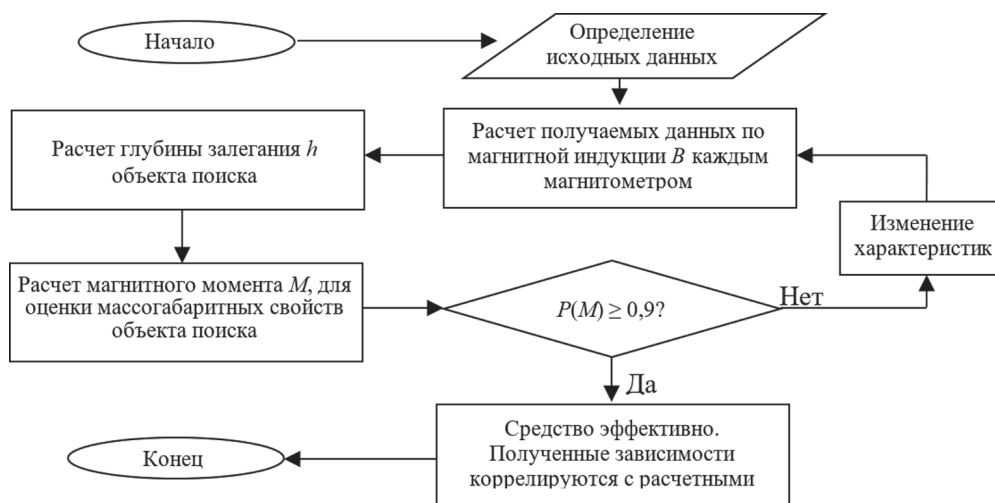


Рис. 4. Структурно-логическая схема методики расчетной оценки многоканальной магнитометрической системы (ММС)

Fig. 4. Structural and logical scheme of the multichannel magnetometric system (MMS) estimation methodology

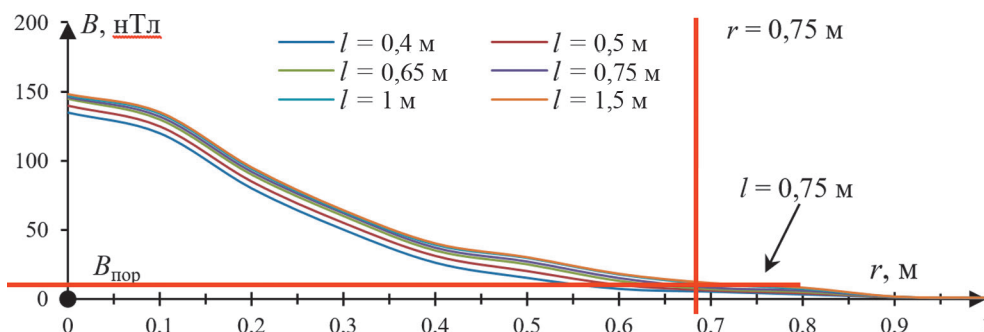


Рис. 5. Зависимость амплитуды регистрируемого сигнала от топологии расположения магнитометрических датчиков: l – база ЧЭ; r – расстояние между ЧЭ

Fig. 5. The dependence of the amplitude of the recorded signal on the topology of the location of the magnetometric sensors: l – the base of the sensor element; r – the distance between the sensor elements

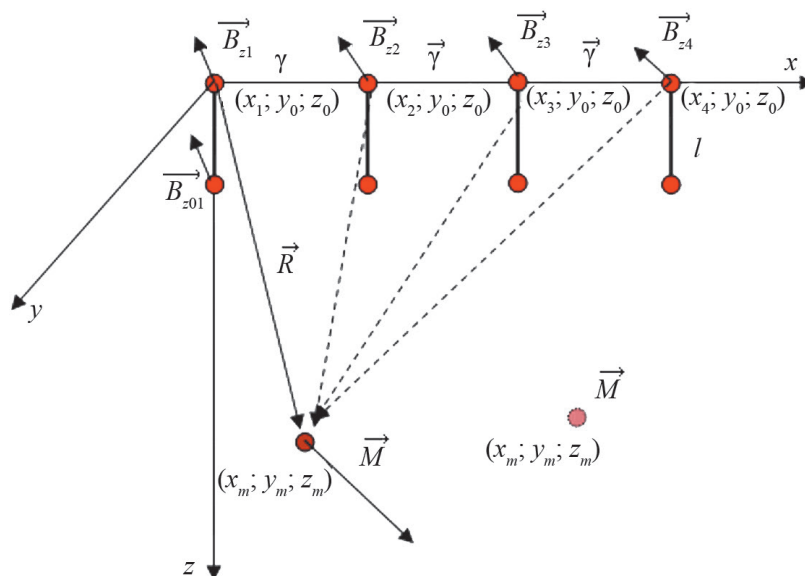


Рис. 6. Схема функционирования ММС

Fig. 6. The scheme of functioning of the MMS

Однако их эксплуатация затруднительна на скорости около 1 м/с и более.

Исходя из результатов расчета амплитуд сигналов по выражению (1) при варьировании базы в пределах $l = 0,4-1,5$ м, применяемых в известных зарубежных изделиях, делается выбор $l = 0,75$ м, т.е. величина базы равна расстоянию между ЧЭ в ММС [18, 19].

Проведенные компьютерные и натурные экспериментальные исследования предложенного метода анализа и обработки данных в макете ММС, разработанного в соответствии с предложенной конструкцией (рис. 6), показали возможность построения карты магнитных аномалий с последующей оценкой ориентации и глубины залегания в грунте объектов поиска [20].

Моделирование сигналов в программной среде MathCAD позволило оценить зависимость амплитуды магнитной индукции B при различных конструктивных параметрах ММС.

В отличие от взятого за основу математического аппарата общего решения для магнитного потенциала:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{3 \left(\frac{\vec{M} \vec{R}}{R} \right) \vec{R}}{R^5} - \frac{\vec{M}}{R^3} \right), \quad (2)$$

в выражение для расчета магнитной индукции объекта внесены изменения, учитывающие расстояния r между ЧЭ.

Применяя (2) для измерения z -компоненты вектора магнитной индукции B , для 4-канальной ММС получена система уравнений (3) по оценке зависимости амплитуды магнитной индукции B при различных конструктивных параметрах ММС:

$$\begin{cases} B_1 = \frac{\mu_0}{4\pi |\vec{R}|^5} \left[3M_x(x_m - x_1)z_m + 3M_y y_m z_m + M_z (2z_m^2 - (x_m - x_1)^2 - y_m^2) \right]; \\ B_2 = \frac{\mu_0}{4\pi |\vec{R}-r|^5} \left[3M_x(x_m - x_2)z_m + 3M_y y_m z_m + M_z (2z_m^2 - (x_m - x_2)^2 - y_m^2) \right]; \\ B_3 = \frac{\mu_0}{4\pi |\vec{R}-2r|^5} \left[3M_x(x_m - x_3)z_m + 3M_y y_m z_m + M_z (2z_m^2 - (x_m - x_3)^2 - y_m^2) \right]; \\ B_4 = \frac{\mu_0}{4\pi |\vec{R}-3r|^5} \left[3M_x(x_m - x_4)z_m + 3M_y y_m z_m + M_z (2z_m^2 - (x_m - x_4)^2 - y_m^2) \right], \end{cases} \quad (3)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; \vec{M} – магнитный дипольный момент; \vec{R} – вектор расстояния от точки измерения до диполя; r – расстояние между ЧЭ в многоканальном магнитометре.

Таким образом, модель сигналообразования в ММС определяется расположением ее ЧЭ относительно объекта поиска, представленного в виде магнитного диполя M .

На рис. 7–10 представлены зависимости амплитуд сигналов крайних ЧЭ B_1 и B_4 для случаев обнаружения объектов с магнитным моментом $M = 1,8 \text{ Ам}^2$ и $M = 50 \text{ Ам}^2$, установленных на глубине от 3 до 8 м.

Анализ графиков (рис. 7–10) показывает, что изменение глубины залегания и магнитного момента объекта поиска существенно изменяет не только форму (магнитуду), но и амплитуду полезного сигнала. Зависимости магнитуд B_1, B_4 от расстояния до объекта поиска весьма велики, особенно в сравнении относительно малых $h \leq 1,5-3$ и больших глубин $h \geq 5$.

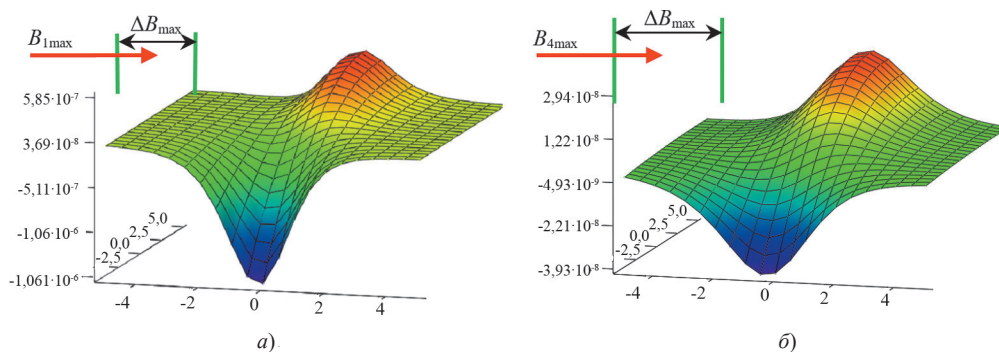


Рис. 7. Магнитуды сигналов для случая обнаружения объекта с магнитным моментом $M = 1,8 \text{ Ам}^2$ на глубине $h = 3 \text{ м}$: *a* – для B_1 ; *б* – для B_4
Fig. 7. Magnitudes of signals for the case of detecting an object with a magnetic moment $M = 1,8 \text{ Ам}^2$ at a depth $h = 3 \text{ м}$: *a* – for B_1 ; *б* – for B_4

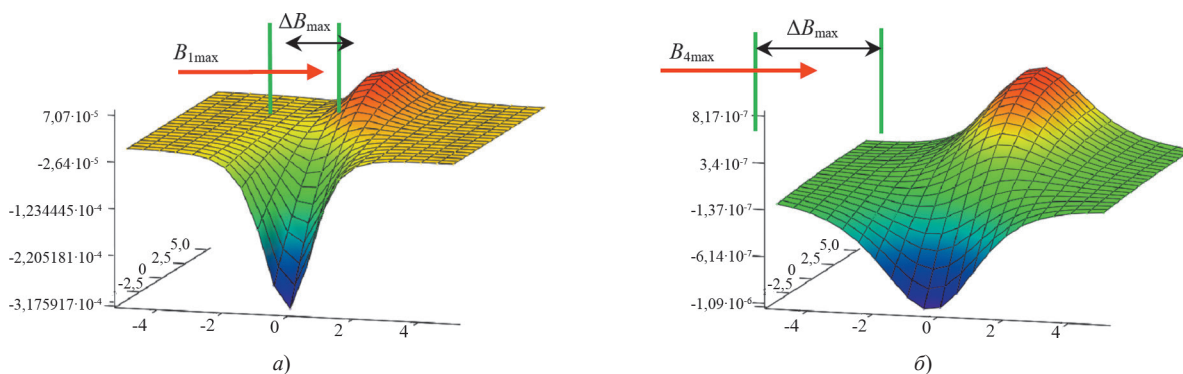


Рис. 8. Магнитуды сигналов для случая обнаружения объекта с магнитным моментом $M = 50 \text{ Ам}^2$ на глубине $h = 3 \text{ м}$: *a* – для B_1 ; *б* – для B_4
Fig. 8. Magnitudes of signals for the case of detecting an object with a magnetic moment $M = 50 \text{ Ам}^2$ at a depth $h = 3 \text{ м}$: *a* – for B_1 ; *б* – for B_4

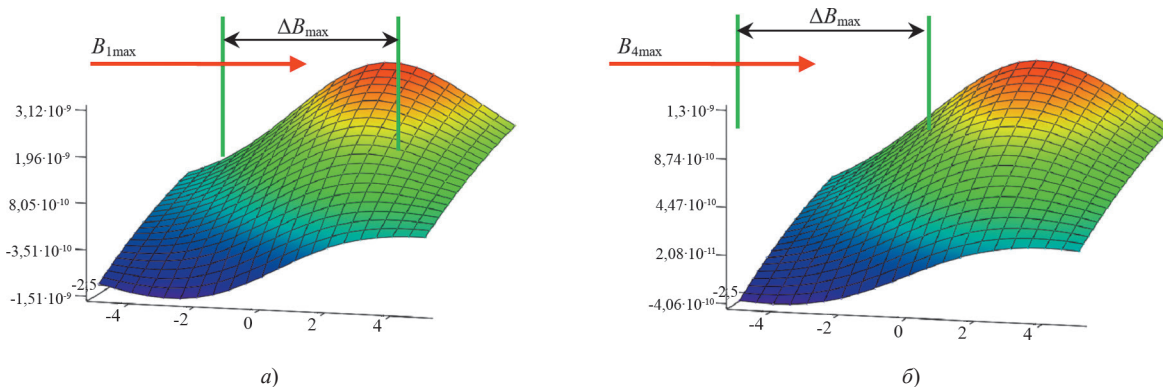


Рис. 9. Магнитуды сигналов для случая обнаружения объекта с магнитным моментом $M = 1,8 \text{ Ам}^2$ на глубине $h = 8 \text{ м}$: *a* – для B_1 ; *б* – для B_4
Fig. 9. Magnitudes of signals for the case of detecting an object with a magnetic moment $M = 1,8 \text{ Ам}^2$ at a depth $h = 8 \text{ м}$: *a* – for B_1 ; *б* – for B_4

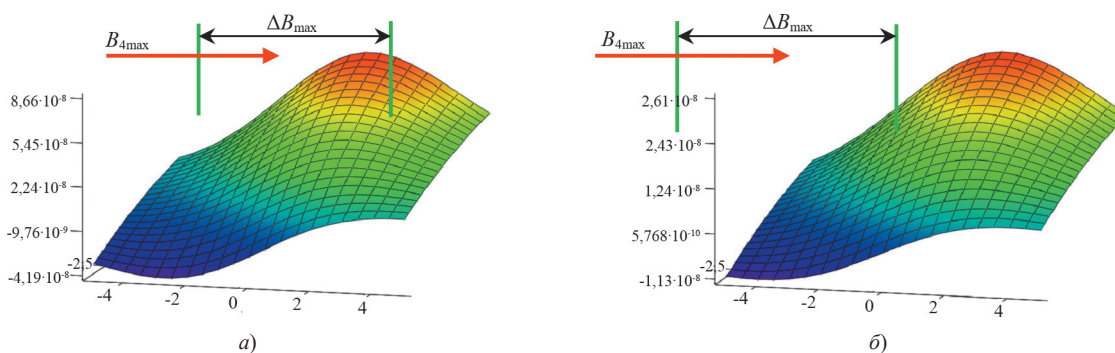


Рис. 10. Магнитуды сигналов для случая обнаружения объекта с магнитным моментом $M = 50 \text{ Ам}^2$ на глубине $h = 8 \text{ м}$: *a* – для B_1 ; *б* – для B_4
Fig. 10. Magnitudes of signals for the case of detecting an object with a magnetic moment $M = 50 \text{ Ам}^2$ at a depth $h = 8 \text{ м}$: *a* – for B_1 ; *б* – for B_4

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

Таким образом, результаты компьютерного моделирования сигналов ММС подтвердили возможность построения карты магнитных аномалий для оценки глубины залегания и характера расположения объекта поиска в грунте.

«Идеальный» магнитный момент M , характеризующий 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. 11) [21].

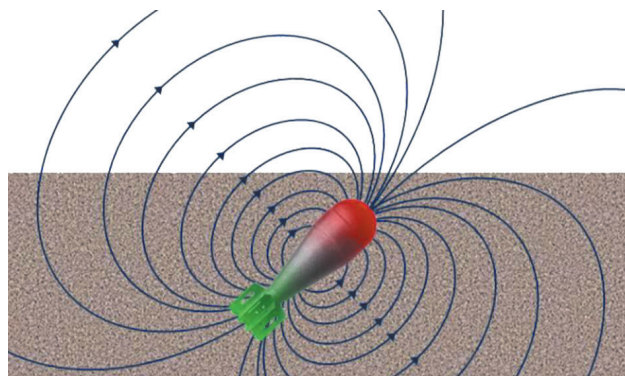


Рис. 11. Условная полярность объекта поиска
Fig. 11. Conditional polarity of the search object

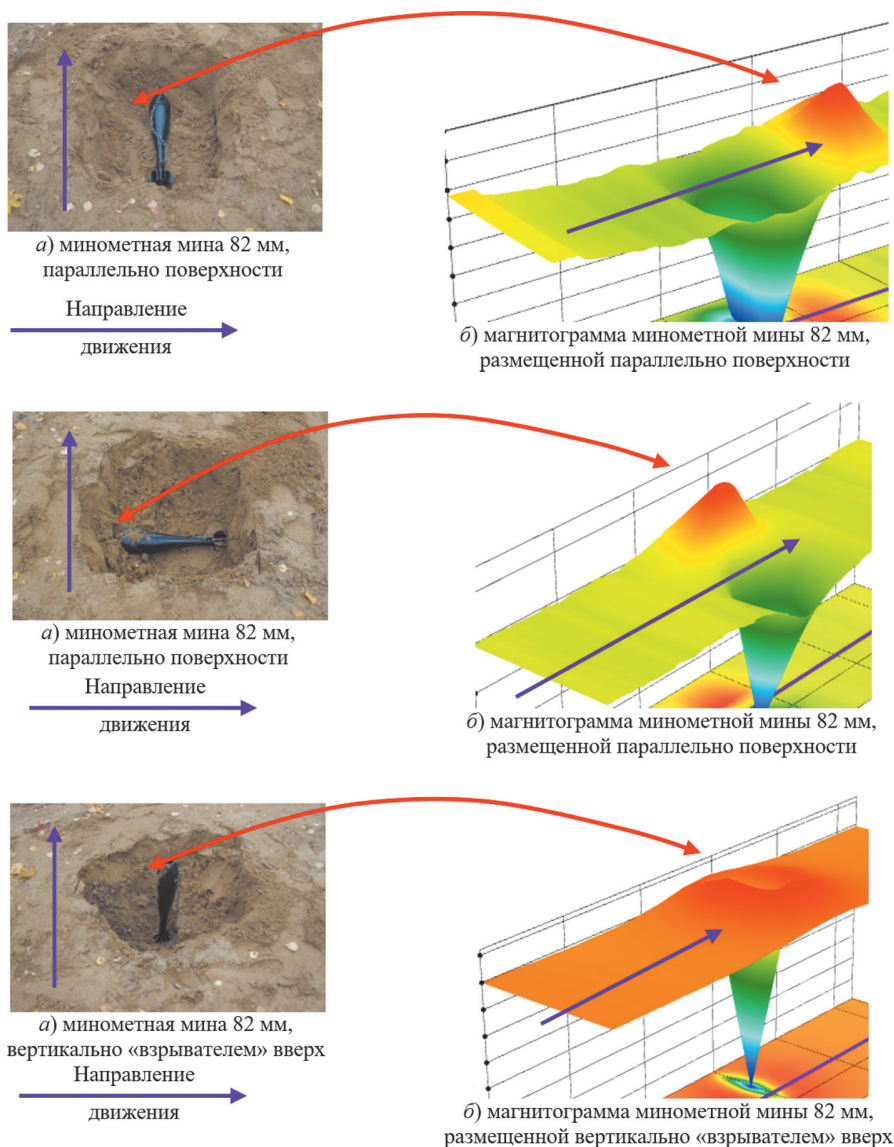


Рис. 12. Зависимость формы магнитограммы объекта от его ориентации
Fig. 12. Dependence of the object magnetogram shape on its orientation



Рис. 13. Модель технического облика ММС для АНПА

Fig. 13. Model of the technical appearance of the MMC for the ANPA

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. Результаты экспериментальных исследований зависимости полученных магнитограмм реальных объектов (формы сигнала) от их типа показаны на рис. 12.

Как видно из рис. 12, форма магнитограмм объектов поиска зависит не только от типа, но и от ориентации объекта относительно поверхности. Данная зависимость позволяет распознавать (идентифицировать) объекты поиска, определять их ориентацию и глубину залегания.

По определенным параметрам базы и расстояния между соседними ЧЭ в соответствии с расчетной методикой предложена модель технического облика ММС для размещения в качестве целевой нагрузки АНПА (рис. 13).

Вывод: предложенная многоканальная магнитометрическая система в качестве целевой нагрузки для решения задач поиска НВБ и археолого-геологических изысканий будет обладать рядом преимуществ перед применяемыми в настоящее время методами поиска и позволит:

оценивать ориентацию и глубину залегания объекта поиска в грунте;

определять тип объекта поиска;

за счет увеличения до 4 м зоны обнаружения обеспечить более высокий темп поиска: до 16 000 м²/ч при скорости движения АНПА не менее 1,5 м/с по сравнению с работой водолаза и применением одиночного магнитометра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Барышева Е.Н., Сараев А.Л. К расчету убытков от повреждения взрывоопасными объектами при прокладке газопровода «Северный поток». – Вестник СамГУ, 2010, № 7(81), с. 5–15.
3. Ольховский С.В., Степанов А.В. Магнитометрические разведки в акватории Фанагории. – Вопросы подводной археологии, 2013, № 1, с. 53–58.

4. Гершанок Л.А. Малоуглубленная магниторазведка в условиях промышленных помех. – Вестник Пермского университета. Геология, 2013, №1 (18), с. 34–49.

5. Робототехника [Электрон. ресурс] URL: <http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/> (дата обращения: 05.05.2021).

6. Руководство по водолазным работам в сухопутных войсках. Ч. 1. М.: Военное издательство, 2007, 224 с.

7. Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин» [Электрон. ресурс] URL: http://ckb-rubin.ru/ckb_mt_rubin/ (дата обращения: 05.05.2021).

8. Необитаемый подводный аппарат «Амулет» [Электрон. ресурс] URL: http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/anpa_amulet/ (дата обращения: 05.05.2021).

9. Необитаемый подводный аппарат «Талисман» [Электрон. ресурс] URL: http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/tnpa_talisman/ (дата обращения: 05.05.2021).

10. Арбузов О.И. Магниточувствительные поисковые приборы. – Специальная техника, 2000, № 6, с. 18–24.

11. Щербаков Г.Н., Анцелевич М.А., Удинцев Д.Н., и др. Применение магнитной томографии в проходных металлодетекторах. – Специальная техника, 2007, № 6, с. 38–40.

12. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. Л.: Энергоатомиздат, 1986, 187 с.

13. The International Mine Action Standards (IMAS) [Электрон. ресурс] URL: <https://www.mineactionstandards.org> (дата обращения: 05.05.2021).

14. Mathcad Resources [Электрон. ресурс] URL: <https://www.mathcad.com/ru> (дата обращения: 05.05.2021).

15. 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.

16. Ferex 4.032. Technical description. Foerster Institute Dr. Forster. Edition 09/2000, 16 p.

17. Модульный УХО детектор для применения в скважинах и под водой [Электрон. ресурс] URL: <https://www.vallon.de/ru/magnetometer> (дата обращения: 05.05.2021).

18. МБИ-П. Техническое описание и инструкция по эксплуатации БИВР.411172.001ТО, 71 с.

19. Humanitarian mine clearance [Электрон. ресурс] URL: <https://ebingergroup.de/en/products/humanitarian-mine-clearance/> (дата обращения: 05.05.2021).

20. Соколов Н.А. Многоканальная магнитометрическая система для разминирования больших территорий. – Сб. материалов XV Всеросс. научно-практической конф. «Перспективные системы и задачи управления», 2020, с. 214–220.

21. Звездинский С.С., Парфенцев И.В. Метод магнитометрического обнаружения взрывоопасных предметов. – Специальная техника, 2008, № 2, с. 8–17.

[18.04.2021]



Авторы: **Соколов Николай Александрович** – старший научный сотрудник Центрального научно-исследовательского испытательного института инженерных войск Минобороны России.



Рыков Андрей Владимирович – доктор техн. наук, начальник научно-исследовательского центра, Военный учебно-научный центр Сухопутных войск «Общевойсковая академия Вооруженных Сил Российской Федерации».



Щербаков Григорий Николаевич – доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник Военного учебно-научного центра Сухопутных войск «Общевойсковая академия Жукова академия ВС РФ».



Ефремов Игорь Анатольевич – старший научный сотрудник Научно-производственного объединения «Специальная техника и связь» МВД России.

Elektrichestvo, 2021, No. 7, pp. 51–60

DOI:10.24160/0013-5380-2021-7-51-60

Multichannel Magnetometric System for Increasing the Search Capabilities of Autonomous Uninhabited Underwater Vehicles

SOKOLOV Nikolay A. (Central Research and Testing Institute of Engineering Troops of the Russian Ministry of Defense, Nakhabino, Moscow region, Russia) – Senior Researcher.

RYCHKOV Andrey V. (Military Training and Research Center of the Land Forces "Combined Arms Order of Zhukov Academy of the Armed Forces of the Russian Federation", Moscow, Russia) – Head of the Research Center; Dr. Sci. (Eng.).

SHCHERBAKOV Grigori N. (Military Training and Research Center of the Land Forces "Combined Arms Order of Zhukov Academy of the Armed Forces of the Russian Federation", Moscow, Russia) – Leading Researcher; Dr. Sci. (Eng.).

EFREMOV Igor A. (Research and Production Association "Special Equipment and Communications" of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Moscow, Russia) – Senior Researcher.

The advantages of using autonomous underwater vehicles in searching for ferromagnetic objects based on recording of spatially distributed magnetic anomalies are considered. The development lines of multichannel magnetometric search tools are shown. The potential capabilities of multichannel magnetometric systems for identifying search objects are revealed. Processing the survey results and drawing up a map of magnetic anomalies will make it possible to identify structures the geomagnetic properties of which differ essentially from the natural magnetic background. The use of such technique opens the possibility to achieve a significantly fuller information content and better reliability of the water area survey results and reveal visually undistinguished objects that have their own magnetic field. Based on the electromagnetic field and magnetostatics theory, a method for calculating the parameters and performance efficiency of the multichannel magnetometric system for autonomous underwater vehicles has been developed. The method is designed to evaluate the parameters of and capabilities for detecting ferromagnetic objects and to make a preliminary assessment of the search efficiency. The results obtained from computer simulation of the multichannel magnetometric system signals have confirmed the possibility of drawing up a map of magnetic anomalies to assess the occurrence depth and location of the search object in the ground. The shape of the search object magnetograms depends not only on the object type, but also on its orientation relative to the surface. By applying this dependence, it is possible to recognize search objects, determine their orientation and occurrence depth.

Key words: search for objects in water, underwater search, autonomous underwater vehicle, target load, magnetometric target load, magnetometric system, magnetic moment, magnetic induction

REFERENCES

1. Dobrotvorsky A.N., Bochkarev E.N., Nikishov V.N. *Sovremennoe sostoyanie i problemy navigatsii i okeanografii: sb. nauch. trudov* – in Russ. (Current state and problems of navigation and oceanography: collection of scientific works), SPb, 2004, vol. 2, pp. 256–265.
2. Barysheva E.N., Saraev A.L. *Vestnik SamGU* – in Russ. (Bulletin of the Samara State University), 2010, No. 7(81), pp. 5–15.

3. Ol'hovskiy S.V., Stepanov A.V. *Voprosy podvodnoy arheologii* – in Russ. (Questions of underwater archaeology), 2013, No. 1, pp. 53–58.
4. Gershanok L.A. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya* – in Russ. (Bulletin of the Perm University: Geology), 2013, No.1 (18), pp. 34–49.
5. *Robototekhnika (Robotics)* [Electron. resource] URL: <http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/> (Date of appeal: 05.05.2021).
6. *Rukovodstvo po vodolaznym rabotam v suhoputnykh voyskah. Ch.1* (Guide to diving operations in the Army. P.1). M.: Voennoe izdatel'stvo, 2007, 224 p.

7. **Central Design Bureau** for Marine Engineering “Rubin” [Electron. resource] URL: http://ckb-rubin.ru/ckb_mt_rubin/ (Date of appeal: 05.05.2021).
8. **Autonomous unmanned underwater vehicle** “Amulet” [Electron. resource] URL: http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/anpa_amulet/ (Date of appeal: 05.05.2021).
9. **Autonomous unmanned underwater vehicle** «Talisman» [Electron. resource] URL: http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/tnpa_talisman/ (Date of appeal: 05.05.2021).
10. **Arbuzov O.I.** *Spetsial'naya tekhnika – in Russ. (Special technique)*, 2000, No. 6, pp. 18–24.
11. **Shcherbakov G.N., Antselevich M.A., Udintsev D.N., et al.** *Spetsial'naya tekhnika – in Russ. (Special technique)*, 2007, No. 6, pp. 38–40.
12. **Afanasyev Yu.V.** *Ferrozondovye pribory (Ferrosonde devices)*. L.: Energoatomizdat, 1986, 187 p.
13. **The International Mine Action Standards (IMAS)** [Electron. resource] URL: <https://www.mineactionstandards.org> (Date of appeal: 05.05.2021).
14. **Mathcad Resources** [Electron. resource] URL: <https://www.mathcad.com/ru> (Date of appeal: 05.05.2021).
15. **Shcherbakov G.N., Antselevich M.A., Udintsev D.N.** *Spetsial'naya tekhnika – in Russ. (Special technique)*, 2004, No. 2, pp. 38–40.
16. **Ferex 4.032**. Technical description. Foerster Institute Dr. Forster. Edition 09/2000, 16 p.
17. **Modular UXO** detector for use in wells and under water [Electron. resource] URL: <https://www.vallon.de/ru/magnetometer> (Date of appeal: 05.05.2021).
18. **MBI-P.** *Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii BIVR.411172.001TO* (MBI-P. Technical description and operating instructions BIVR. 411172 001 TO), 71 p.
19. **Humanitarian** mine clearance [Electron. resource] URL: <https://ebingergroup.de/en/products/humanitarian-mine-clearance/> (Date of appeal: 05.05.2021).
20. **Sokolov N.A.** *Sb. materialov XV Vseross. nauchno-prakticheskoy konf. «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya» – in Russ. (Collection of materials of the XV All-Russian Scientific and practical conference "Perspective systems and management tasks")*, 2020, pp. 214–220.
21. **Zvezhinskiy S.S., Parfentsev I.V.** *Spetsial'naya tekhnika – in Russ. (Special technique)*, 2008, No. 2, pp. 8–17.

[18.04.2021]