

## МЕТОДЫ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ МОРСКОЙ МАГНИТОМЕТРИИ

**Нерсесов Б.А.**

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,  
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: nba1940@yandex.ru*

Статья поступила в редакцию 15.08.2019, одобрена к печати 21.11.2019

Морские магнитометры являются перспективными средствами мониторинга акватории с предполагаемым наличием подводных потенциально опасных объектов. Они с успехом используются при их поиске, особенно в условиях неэффективности гидроакустических средств: на мелководье, в любых средах (воде и грунте) и, главное, на границах этих сред.

Как правило, поиск подводного объекта магнитометрическими средствами проводится по траектории «ортогональных галсов», основными характеристиками которой являются ширина полосы поиска (в зависимости от магнитных характеристик подводного объекта) и длина поискового галса.

Анализ тенденций развития морских магнитометров выявил следующие основные направления: расширение их функциональных возможностей, повышение чувствительности датчиков магнитного поля и увеличение массогабаритных характеристик. Однако, в соответствии с современными требованиями, основные направления развития средств морской магнитометрии изменились кардинальным образом. Установлено, что процесс обнаружения подводного ферромагнитного объекта мобильными магнитометрами носит стохастический характер, который не учитывается традиционной методикой определения рекомендованной полосы поиска подводного объекта, что приводит к риску его пропуска.

Поэтому актуальной проблемой совершенствования поисковых магнитометрических средств является разработка методологического аппарата оценки эффективности обнаружения подводных объектов. Предложен новый (вероятностный) подход к алгоритму обработки информации магнитометрического сигнала, определяющий ширину рекомендованной полосы поиска объекта с гарантированными значениями вероятностных характеристик его обнаружения. Статья носит постановочный характер.

**Ключевые слова:** магнитометрическая система, подводный объект, датчик магнитного поля, вероятностные характеристики, эффективность, методы, поиск, обнаружение

### 1. Анализ основных тенденций развития морских магнитометрических систем

За последние годы получили развитие работы, связанные с поиском экологически опасных подводных объектов (затонувших судов, затопленных химических боеприпасов и ядерных отходов) в акваториях интенсивного рыболовства, а также подводных инженерных сооружений (донных трубопроводов, основ мостов и т.п.) (Вялышев, Нерсесов, Римский-Корсаков, 2016).

Перспективными средствами мониторинга акватории являются морские магнитометрические системы (ММС), которые широко используются при поиске подводных объектов, особенно в условиях неэффективности гидроакустических средств: на мелководье, в любых средах (воде и грунте) и, главное, на границах этих сред.

При этом магнитометрический поиск подводного объекта (ПО) происходит по траектории «ортогональных галсов», основными характеристиками которой являются ширина полосы поиска, зависящая от магнитных характеристик ПО, а также длина поискового галса.

Анализ современных тенденций развития ММС показал, что они принципиально изменились и требуют учета стохастического характера поискового процесса (Нерсесов, 2018).

В то время как традиционная методика определения рекомендованной полосы поиска подводного объекта проводилась без учета его случайного пространственного положения и, связанного с этим, неопределенного отношения «сигнал–помеха», что приводило к недопустимым ошибкам его обнаружения (Семевский и др., 2002).

Поэтому актуальной проблемой совершенствования поисковых магнитометров является разработка методологического аппарата вероятностной оценки эффективности обнаружения подводного объекта.

## **2. Методы вероятностной оценки эффективности средств морской магнитометрии**

Принципиально новым направлением развития ММС стала оценка их эффективности в терминах вероятностных характеристик обнаружения в рекомендуемой полосе поиска.

### **2.1. Разработка методологических основ оценки эффективности ММС**

Предложен новый (вероятностный) подход к алгоритму обработки информации магнитометрического сигнала с учетом стохастического характера процесса поиска подводного объекта (Нерсесов, Афанасьев, 2013).

При этом критерием эффективности поискового процесса с использованием ММС является ширина рекомендованной полосы поиска ПО с гарантированными значениями вероятностных характеристик его обнаружения, которая определяется в соответствии с комплексной методикой, включающей методы:

- статистического моделирования и селекции магнитометрических сигналов объекта и помехи (при фиксированном расстоянии ПО – датчик магнитного поля (ДМП) в полосе поиска);
- градации (деления) традиционной полосы поиска ПО на зоны гарантированной вероятности его обнаружения;
- оценки эффективной полосы обнаружения подводного объекта.

### 2.1.1. Метод статистического моделирования и селекции магнитометрических сигналов объекта и помехи

Метод статистического моделирования магнитометрических сигналов предполагает определение параметров закона распределения амплитудных значений индукции магнитного поля подводного объекта и буксировщика, в том числе:

– измерение и статистический анализ амплитудных характеристик магнитограмм подводного объекта, а также буксировщика на фиксированных удалениях от поискового галса ММС;

– анализ физических моделей магнитных полей ПО и буксировщика с учетом их трансформации в пространстве (от пространственного мультиполя до точечного диполя);

– выбор вида статистических моделей магнитометрических сигналов ПО и буксировщика с учетом физических моделей их магнитных полей в полосе поиска.

Установлено, что закон Райса может быть универсальным определением максимальных амплитудных значений магнитограмм распределенного мультипольного, а также точечного дипольного подводного объекта (Нерсесов, 2018).

При этом на удалении большем длины подводного объекта, его физическая модель становится дипольной, а закон распределения амплитудных значений индукции магнитного поля – нормальным.

Важным этапом метода селекции статистических моделей распределений «сигнал–помеха» является выбор порога принятия решения.

При этом условные распределения сигналов объекта и буксировщика (помехи) сравниваются с пороговым значением  $X_c$ . Превышение сигналом порога селекции квалифицируется как правильное обнаружение (рис. 1).

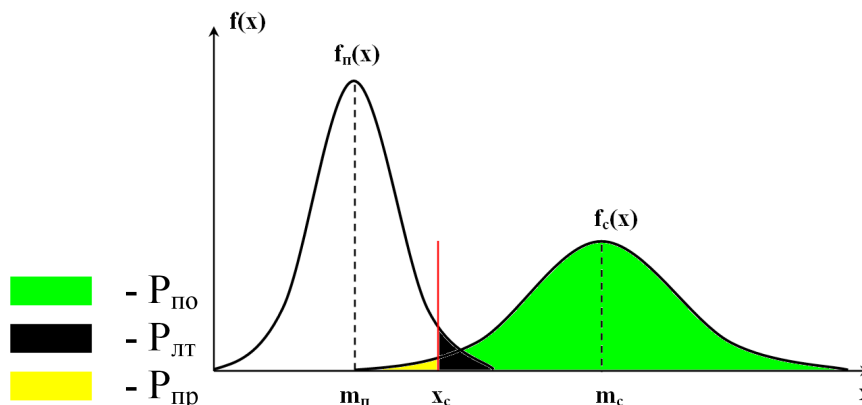


Рис. 1. Выбор порога селекции статистических моделей «сигнал–помеха»,  $P_{по}$  ( $P_c$ ) – вероятность правильного обнаружения (селекции);  $P_{лт}$  – вероятность ложной тревоги;  $P_{пр}$  – вероятность пропуска объекта;  $P_{co} = 0.5 (P_{пр} + P_{лт})$  – вероятность средней ошибки обнаружения ПО.

Как правило, выбор порога селекции сводится к одному из двух классических критериев: Неймана–Пирсона или Идеального наблюдателя (Колмогоров, 1977;

Левин, 1975). При определении порога селекции по критерию Неймана-Пирсона, широко используемого в радиолокации, предполагается минимизация вероятности ложной тревоги ( $P_{лт} - \min$ ).

В то время как при проведении поисковой операции оптимальным является критерий Идеального наблюдателя, при котором обеспечивается минимизация вероятности средней ошибки обнаружения ПО –  $P_{co} - \min$  (Нерсесов, Афанасьев, 2013).

### 2.1.2. Метод градации (условного деления) традиционной полосы поиска ПО на зоны гарантированной вероятности его обнаружения

Оценка эффективности селекции сигнала объекта на фоне технических помех буксировщика позволяет установить граничные условия зон вероятности обнаружения ПО с заданными значениями  $P_{по}$ ,  $P_{лт}$  и  $P_{пр}$ , а также определить отношения «сигнал–помеха» – С/П, соответствующие этим зонам (табл. 1).

Таблица 1. Градация вероятностей зон обнаружения ПО

Абсолютной $P_c = 1.0; P_{co} = 0$ $C/P \geq 12$	
Квазиабсолютной $P_c \geq 0.9; P_{co} \leq 0.1$ $C/P \geq 8$	
Допустимой $P_c \geq 0.8; P_{co} \leq 0.2$ $C/P \geq 6$	
Квазинеопределенной $P_c > 0.5; P_{co} < 0.5; C/P > 1$	

С одной стороны, при нахождении подводного объекта ближе к поисковому галсу амплитуда его сигнала, отношение «сигнал/помеха», а также вероятность его обнаружения будут больше. С другой стороны, при равновероятным пространственном положении ПО, нельзя исключать его положение на краю полосы поиска.

Поэтому при случайном пространственном положении ПО целесообразна градация (условное деление) традиционной полосы поиска на отдельные полосы (абсолютной, квазиабсолютной, допустимой и квазинеопределенной) вероятности, что позволит решить проблему гарантированного обнаружения подводного объекта (Нерсесов, Афанасьев, 2013).

В ситуации же традиционного поиска ПО в зоне неопределенной вероятности обнаружения ( $P_c = 0.5; P_{co} = 0.5; C/P = 1$ ) возникает недопустимый риск его пропуска.

Таким образом, для исключения пропуска подводного потенциально опасного объекта ширина рекомендованной полосы его поиска должна соответствовать зоне гарантированного обнаружения с вероятностными характеристиками, заданными заказчиком.

### 2.1.3. Методика оценки эффективности ММС

Критерием эффективности ММС по поиску ПО конкретного типа (с установленным магнитным моментом) является ширина полосы обнаружения подводного объекта с заданными вероятностными характеристиками.

Методика оценки эффективности ММС предполагает последовательное выполнение ряда этапов – методов, изложенных в п.2.1 (табл. 2).

Таблица 2. Основные этапы оценки эффективности ММС

Измерения и статистический анализ амплитудных характеристик магнитнограмм подводного объекта в зоне поиска, а также буксировщика на фиксированном удалении от ммс
Анализ физических моделей магнитных полей ферромагнитных объектов с учетом их качественной трансформации в пространстве
Определение порога селекции распределений «сигнал–помеха» в соответствии с критерием идеального наблюдателя
Градация традиционной полосы поиска подводного объекта на зоны гарантированных вероятностей его обнаружения
Оценка эффективных значений ширины полосы поиска подводного объекта с заданными вероятностными характеристиками его обнаружения

Причем в качестве предварительного этапа уточняются магнитные характеристики подводного объекта и буксировщика, длина буксировочного троса и чувствительность датчика ММС.

После чего проводится статистический анализ амплитудных характеристик магнитнограмм подводного объекта и буксировщика при фиксированных расстояниях от ДМП с учетом трансформации физической модели магнитного поля ПО.

Важными этапами оценки эффективности ММС являются выбор порога селекции по критерию Идеального наблюдателя, градация традиционной полосы поиска ПО на зоны гарантированного его обнаружения, а также определение эффективной полосы обнаружения с заданными вероятностными значениями селекции –  $P_c$  и средней ошибки –  $P_{\infty}$  (Нерсесов, Афанасьев, 2013).

К сожалению, ограниченный текст статьи не предполагает детальное изложение методологии вероятностной оценки обнаружения ПО. Подробно методы, формулы, таблицы и рекомендации приведены в монографии (Нерсесов, Афанасьев, 2013).

### 2.2. Метод определения допустимого снижения чувствительности датчиков магнитного поля

Одной из основных тенденций развития ММС первого поколения является разработка высокочувствительных (до 0.01–0.001 нТл) ДМП, которые должны были обеспечить значительное увеличение полосы поиска. Однако при этом не учитывался стохастический характер процесса поиска ПО, что приводило к недопустимым ошибкам его обнаружения, особенно вблизи границы поисковой полосы.

Однако предлагаемая градация традиционной полосы поиска ПО на отдельные полосы гарантированной вероятности его обнаружения и определение требуе-

мого отношения  $C/P$ , позволяет значительно ограничить чувствительность датчиков магнитного поля.

Для определения допустимого уровня чувствительности ДМП проведена оценка расчетной дальностей обнаружения ПО при разных значениях чувствительности датчика – 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 нТл (Нерсесов, Афанасьев, 2013).

При этом оценивалась степень реализации потенциальной чувствительности магнитометрических датчиков в условиях помех буксировщика –  $K = D_3/D_0$  в зависимости от требуемых вероятностных характеристик ( $P_c = 0.8 \dots 1.0$ ) обнаружения подводного объекта (рис. 2).

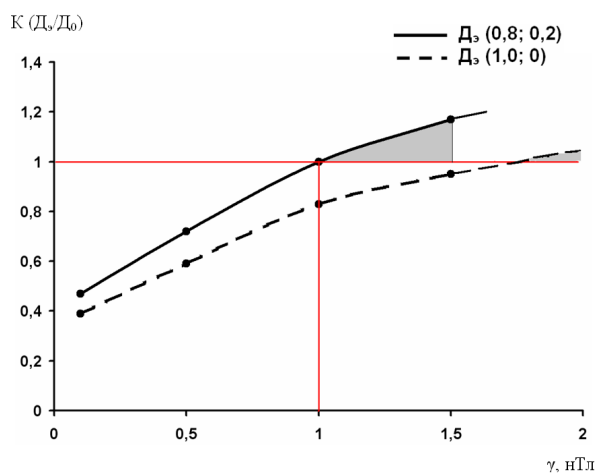


Рис. 2. График зависимости  $K = D_3/D_0$  от требуемых вероятностных характеристик при обнаружении затонувшего судна.

Таким образом, разработка методологических основ статистической магнитометрии позволит обосновать также и допустимое снижение чувствительности датчика магнитного поля без уменьшения требуемой вероятности обнаружения ПО.

### 2.3. Уменьшение массогабаритных характеристик ММС

Важной проблемой совершенствования средств морской магнитометрии является их миниатюризация. Но традиционное увеличение чувствительности ДМП, как правило, приводит к повышенным массогабаритным показателям (Семевский и др., 2002).

Так габариты квантового датчика чувствительностью 0.01 нТл составляют: длина – 120 см, диаметр – 12.7 см, а масса – 1400 г.

Тогда как феррозондовые ДМП при чувствительности 0.1 нТл имеют габариты: длину – 5–7 см, диаметр – 1.2–1.8 см и массу – 250–400 г.

При обосновании снижения чувствительности ДМП в полосе гарантированной вероятности обнаружения ПО миниатюризация датчиков магнитного поля становится допустимой.

Поэтому актуальной является разработка новых технологий формирования тонкопленочных микроструктур (порядка 100 нм) с целью создания на их основе миниатюрных (0.5×0.5×0.05 см) датчиков магнитного поля, что позволит реали-

зовать в магнитометрической системе функции пеленгации и пассивной локации подводного объекта внутри одного измерительного модуля (Афанасьев, 2011; Нерсесов, 2018).

### Заключение

1. Установлено, что процесс обнаружения подводного ферромагнитного объекта мобильными магнитометрами носит стохастический характер, который не учитывается классической методикой оценки рекомендованной полосы поиска подводных объектов. При этом традиционная ширина полосы поиска подводного объекта определяется без учета его случайного пространственного положения, а также неопределенного отношения «сигнал–помеха», что приводит к недопустимым ошибкам обнаружения.

2. Актуальной проблемой совершенствования поисковых магнитометрических средств являются разработка методологического аппарата обработки статистической информации и оценки вероятности обнаружения подводных объектов.

3. Разработан метод определения гарантированной полосы обнаружения ПО с использованием данных статистического анализа амплитудных характеристик магнитограмм подводного объекта и буксировщика при фиксированных расстояниях от ДМП.

4. При условии равновероятного пространственного положения ПО в полосе поиска разработан метод градации (условного деления) на отдельные полосы гарантированной вероятности обнаружения.

5. Разработана методика оценки эффективности селекции сигнала объекта на фоне технических помех буксировщика, позволяющая установить граничные условия зон вероятности обнаружения ПО (абсолютной, квазиабсолютной, допустимой и квазинеопределенной) заданными значениями  $P_{по}$ ,  $P_{лт}$  и  $P_{пр}$ , а также определить отношения «сигнал–помеха» –  $K$ , соответствующие этим вероятностным значениям.

6. Разработан метод определения допустимого снижения чувствительности датчика магнитного поля, приводящий к значительному уменьшению его массогабаритных и стоимостных характеристик.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема №0149-2019-0011) при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-05-60070; проект РГО-а № 17-05-41041).

### Литература

*Афанасьев М.С.* Перспективные технологии создания наноразмерных датчиков магнитных полей // Сборник трудов 12-й международной конференции «МСОИ-2011». Т. 2. М.: ИО РАН, 2011. С. 91–93.

*Вялышев А.И., Нерсесов Б.А., Римский-Корсаков Н.А.* Исследование подводных



потенциально опасных объектов в Черном море // ФГБНУ «Аналитический центр» Министерства образования и науки РФ, М.: 2016. 282 с.

*Колмогоров В.А.* Основные понятия теории вероятностей. М.: Наука, 1977. 119 с.

*Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. М.: «Советское радио», 1975. 342 с.

*Нерсесов Б.А.* Морские магнитометрические системы / Сб. «Освоение морских глубин». М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2018. С. 370–374.

*Нерсесов Б.А., Афанасьев М.С.* Эффективность поисковых средств морской магнитометрии. М.: ФГБНУ «Аналитический центр» Министерства образования и науки РФ, 2013. 147 с.

*Семевский Р.Б., Аверкиев В.В., Яроцкий В.А.* Специальная магнитометрия. СПб: «Наука», 2002. 232 с.

## METHODS OF PROBABILISTIC PERFORMANCE EVALUATION MARINE MAGNETOMETRY

**Nersesov B.A.**

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia, e-mail: [nba1940@yandex.ru](mailto:nba1940@yandex.ru)  
Submitted 15.08.2019, accepted 21.11.2019*

Marine magnetometers are promising means of monitoring the water area with an estimated presence of potentially dangerous underwater objects. They are successfully used when searching for underwater objects in conditions of the ineffectiveness of sonar tools: in shallow water, in any media (water, soil) and, especially, at the boundaries of these media.

As a rule, the search for an underwater object using magnetometric means is carried out along the “orthogonal tacks” trajectory, the main characteristics of which are the search bandwidth (depending on the magnetic characteristics of the underwater object) and the length of a searching tack.

An analysis of the development trends of marine magnetometers revealed the following main directions: the expansion of their functional capabilities, the increase in the sensitivity of magnetic field sensors, and the increase in mass and dimensional characteristics. However, in accordance with modern requirements, the main directions of development of marine magnetometry tools have changed radically.

It has been established that the process of detecting an underwater ferromagnetic object by mobile magnetometers is stochastic in nature, which is not taken into account by the traditional method of determining the recommended search band for an underwater object, which leads to the risk of missing it.

Therefore, the actual problem of improving search magnetometric means is the development of a methodological apparatus for evaluating the efficiency of detection of underwater objects. A new (probabilistic) approach to the information processing algorithm of the magnetometer signal is proposed, which determines the width of the recommended search band of an object with guaranteed values of the probability characteristics of its detection. The article indicates a problem.

**Keywords:** marine magnetometr, underwater object, magnetic field sensor, probabilistic characteristics, efficiency, methods, search, detection.



## References

- Afanasev M.S.* Perspektivnye tekhnologii sozdaniya nanorazmernyh datchikov magnitnyh-polej. V Sbornike-trudov 12 mezhdunarodnoj konferencii MSOI-2011, MAY-2011, Vol. 2, IO RAN. (Perspective technologies for creating nanoscale sensors of magnetic fields, Proceedings of the 12th international conference MAY-2011 Vol. 2, IORAS), Moscow: IORAS, 2011, pp. 91–93.
- Vyalyshev A.I., Nersesov B.A., and Rimsky-Korsakov N.A.* Study of potentially dangerous underwater objects in the Black Sea. FSBI «Analytical Center» of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Moscow, 2016, 282 p.
- Kolmogorov V.A.* Basic concepts of probability theory. Moscow: Science, 1977, 119 p.
- Levin B R* Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki (Theoretical Foundations of Statistical). Moscow: «Sovetskoe radio», 1975, 342 p.
- Nersesov B.A.* Marine magnetometric systems. Sat “Development of the depths of the sea”, Moscow: Publishing house “Weapon and Technology”, 2018, pp. 370–374.
- Nersesov B.A. and Afanasev M. S.* Ehffektivnost-poiskovyh-sredstv-morskoj-magnitometri (The effectiveness of the search tools of marine magnetometry). Moscow: M-FGBNU «Analiticheskij-centr» of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, 2013, 147 p.
- Semevskij R.B., Averkiev V.V., and Yarockij V.A.* Specialnaya-magnitometriya (Special Magnetometry). SPb: «Nauka», 2002, 232 p.