

## СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ДОПУСТИМОГО СНИЖЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МАГНИТОМЕТРА ПРИ СОХРАНЕНИИ ТРЕБУЕМОЙ ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО ОБЪЕКТА

**Б. А. Нересов, Н. А. Римский-Корсаков**

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

Поиск подводных потенциально опасных объектов с использованием буксируемых магнитометрических систем при проведении экологических обследований и аварийно-спасательных работ актуален и сегодня. Существующая практика улучшения результативности поиска за счет повышения чувствительности датчика магнитного поля (до 0.01–0.0001 нТл) повлекла за собой увеличение массогабаритных характеристик оборудования и стоимости исследования. При этом не учитывался стохастический характер процесса поиска, связанного со случайным положением подводного объекта в поисковой полосе, что приводило к неопределенному отношению «сигнал–помеха» и к недопустимому пропуску объекта. Поэтому современный поиск подводных потенциально опасных объектов потребовал их гарантированного обнаружения с повышенной вероятностью. Разработанная методология использования данных статистического анализа амплитудных характеристик индукции магнитного поля подводного объекта (сигнала) и буксировщика (помехи) позволяет определить ширину гарантированной полосы обнаружения. Определены значения отношений средних значений амплитуд их магнитометрических сигналов, соответствующих вероятностным характеристикам обнаружения в зависимости от величин магнитных моментов в полосе поиска. Установлены граничные условия зон гарантированного обнаружения подводных объектов с повышенной вероятностью  $P_c = 0.8–1.0$  в соответствии с уровнем отношений «сигнал–помеха». С учетом стохастического характера процесса поиска подводного объекта проведено обоснование уменьшения допустимого снижения чувствительности магнитометра при сохранении требуемой вероятности обнаружения объекта.

**Ключевые слова:** магнитометр, буксировщик, подводный объект, чувствительность датчика магнитного поля, массогабаритные характеристики, вероятность обнаружения, статистическое обоснование

### Введение

В последние годы особую актуальность приобретают подводные работы, связанные с поиском экологически опасных и аварийных объектов.

Весьма распространенными средствами их обнаружения в акваториях с интенсивной хозяйственной деятельностью являлись буксируемые магнитометрические системы (ММС).

Причем важным техническим решением, уменьшающим уровень различных помех, является переход от одиночного датчика магнитного поля (ДМП) к градиентометрической системе датчиков, снижающей уровень не только геомагнитных вариаций, но и других естественных помех.

Современная стратегия развития отечественных и зарубежных средств магнитометрии требует учета стохастического характера поискового процесса, что предполагает вероятностную оценку обнаружения подводных объектов (ПО).

Кроме того, статистический метод определения рекомендуемой ширины полосы поиска ПО, гарантирующий требуемую вероятность их обнаружения, позволяет также обосновать снижение допустимой чувствительности магнитометра.

Задача исследования заключается в статистическом обосновании допустимого снижения чувствительности магнитометра при сохранении требуемой вероятности обнаружения экологически опасных и аварийных ПО – (0.8–1.0).

## Основная часть

### *1. Специфика оперативного магнитометрического поиска экологически опасных и аварийных подводных объектов*

Проблема развития магнитометрических средств оперативного поиска подводных объектов (затопленных судов с ядерной энергетической установкой (ЯЭУ), аварийных обитаемых подводных аппаратов (ОПА), затопленных химических боеприпасов) при проведении экологических обследований и аварийно-спасательных работ не теряет своей актуальности (Нерсесов, Римский-Корсаков, 2021).

Как правило, маршрут поиска ПО происходит по траектории «меандра» (контрагалса) с заданными характеристиками: шириной полосы поиска, шириной полосы перекрытия между галсами, а также протяженностью поискового галса (Семевский, Аверкиев, 2002).

При поиске аварийных и экологически опасных подводных объектов учитывается априорная информация: о типах искомых объектов, величинах их магнитных характеристик, глубине залегания, а также координатах акватории их вероятного нахождения.

При этом оперативность их обнаружения обеспечивается использованием маломагнитного буксировщика с уменьшенной длиной буксировочного троса и повышенной поисковой производительностью.

Специфика оперативного поиска экологически опасных ПО заключается в их обнаружении с повышенной вероятностью (0.8–0.9), которая определяется заказчиком (Минобороны, МинЧС). В случае поиска аварийных подводных объектов (к примеру, обитаемых подводных аппаратов) требуемая вероятность повышается до  $P_c = 1.0$ .

## ***2. Определение основных характеристик маршрута движения ММС с учетом стохастического характера поискового процесса***

Традиционное определение рекомендуемой ширины полосы поиска проводилось исходя из чувствительности магнетометра и без учета стохастического процесса поиска подводного объекта – его равновероятного пространственного положения в полосе поиска и связанного с этим неопределенного отношения «сигнал–помеха».

Причем при нахождении искомого объекта ближе к поисковому галсу, отношение «сигнал–помеха» и вероятность обнаружения будет значительно превосходить их значения на краю полосы поиска.

В соответствии с современными требованиями и потребностями, актуальной проблемой совершенствования поисковых магнитометрических средств является использование статистического метода оценки вероятности обнаружения подводных объектов с целью определения гарантированной ширины полосы их обнаружения, оптимизации длины буксировочного троса, а также обоснования снижения чувствительности магнитометра (Нерсесов, Римский-Корсаков, 2020).

## ***3. Статистическое моделирование и селекция магнитометрических сигналов объекта и помехи***

Статистическое моделирование магнитометрических сигналов предполагает определение параметров закона распределения амплитудных значений индукции магнитного поля подводного объекта (сигнала) и буксировщика (помехи): математического ожидания –  $m$  и среднеквадратического отклонения –  $\sigma$ .

Установлено, что на удалении большем длины подводного объекта, его физическая модель становится дипольной, а закон распределения магнитометрических сигналов «сигнала» и «помехи» – гауссовым (Левин, 1975).

Важным этапом метода селекции статистических моделей распределений «сигнал–помеха» является выбор порога принятия решения (Колмогоров, 1977). При этом статистические распределения сигналов подводного объекта и буксировщика сравниваются с пороговым значением (рисунок 1).

В условиях неопределенности (равновероятного нахождения ПО в традиционной полосе поиска, рассчитанной, исходя из чувствительности магнетометра) не исключена ситуация нахождения искомого объекта на краю поисковой полосы (при равном отношении «сигнал–помеха»).

Для решения задач гарантированного обнаружения ПО целесообразно использование показателя статистического расхождения альтернативных гипотез «сигнал–помеха» в полосе поиска рекомендуемой ширины (Нерсесов, Римский-Корсаков, 2020).

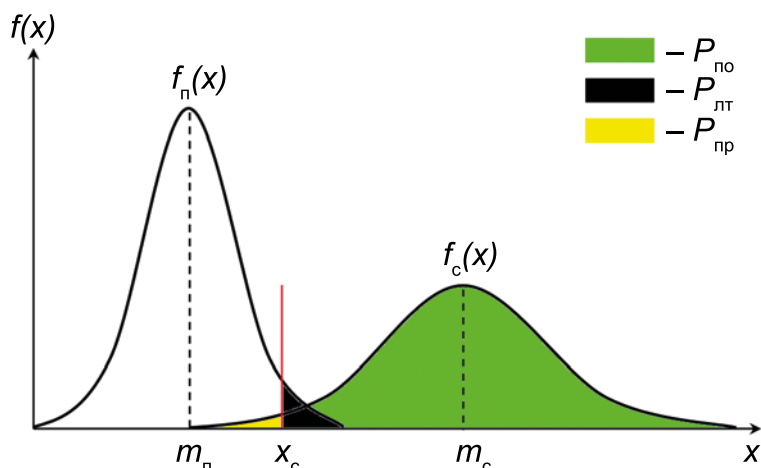


Рис. 1 – Выбор порога селекции статистических моделей «сигнал–помеха», где:  $f(x)$  – функция условного распределения случайной величины;  $x$  – амплитудные значения индукций магнитного поля ПО и буксировщика;  $x_c$  – пороговое значение селекции «сигнала» на фоне «помехи»;  $m_c$  и  $m_n$  – средние значения (математические ожидания) максимальных амплитуд магнитометрических сигналов ПО и буксировщика;  $P_{по}$  ( $P_c$ ) – вероятность правильного обнаружения ПО (селекции сигнала объекта на фоне помехи – буксировщика);  $P_{лт}$  – вероятность ложной тревоги;  $P_{пр}$  – вероятность пропуска объекта;  $P_{co} = 0.5 (P_{пр} + P_{лт})$  – вероятность средней ошибки обнаружения

Анализ зависимости величины расхождения альтернативных гипотез – статистического расстояния математических ожиданий максимальных амплитуд магнитограмм ПО и буксировщика, приведенного к среднеквадратическому отклонению  $\sigma$  их распределений, – показал, что существуют граничные условия селекции сигнала ПО с абсолютным значением вероятности обнаружения:

$$\sqrt{J_{кр}} = \frac{m_c - m_n}{\sigma} \geq 6, \text{ при } \sigma_c = \sigma_n = \sigma.$$

Причем при значительном расхождении гипотез альтернативных распределений, характерных для обнаружения объекта в ближней зоне поиска ( $m_c \gg m_n$ ), наступает случай абсолютной селекции:  $P_c = 1$ ,  $P_{co} = 0$  (рисунок 2).

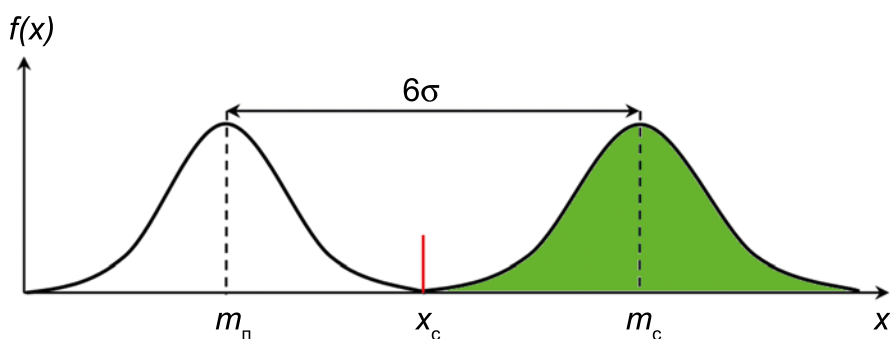


Рис. 2 – Пример абсолютной селекции сигнала ПО на фоне сигнала помехи (буксировщика)

#### **4. Градация традиционной полосы поиска подводного объекта на зоны гарантированной вероятности его обнаружения**

С использованием метода градации (условного деления) традиционной полосы поиска (расчетной полосы, полученной, исходя из чувствительности магнитометра) на уменьшенные полосы абсолютной ( $P_c = 1.0$ ), квазиабсолютной ( $P_c \geq 0.9$ ) и допустимой ( $P_c \geq 0.8$ ) вероятностей, решена проблема гарантированного обнаружения экологически опасных и аварийных подводных объектов со значительным снижением ( $P_{\infty} \leq 0.1 - \leq 0.2$ ) или исключением ( $P_{\infty} = 0$ ) вероятностей их пропуска.

При этом ширина рекомендуемой полосы поиска с гарантируемым обнаружением ПО уменьшается до 0.4–0.6 ширины традиционной (Нерсесов, Римский-Корсаков, 2020).

#### **5. Определение ширины полосы поиска подводных объектов с гарантированной вероятностью их обнаружения при использовании маломагнитного буксировщика**

Исследование динамики максимальных амплитудных значений индукции магнитного поля подводного объекта проводилось на примере поиска аварийного ОПА ( $2.5 \text{ кАм}^2$ ) буксируемой ММС (чувствительностью  $0.1 \text{ нТл}$ ) с использованием маломагнитного ( $0.125 \text{ кАм}^2$ ) буксировщика (моторной надувной лодки «Посейдон») на удалении  $30 \text{ м}$  от ММС.

Более распространенной характеристикой гарантированного приема полезного сигнала на фоне помехи является их отношение (С/П). Исследовалась динамика отношений средних значений сигналов объекта и буксировщика –  $m_c/m_{\text{п}}$  в полосе поиска.

Определены значения математических ожиданий отношений магнитометрических сигналов «сигнал–помеха», соответствующих вероятностным характеристикам обнаружения подводного объекта на фоне помех буксировщика при фиксированных расстояниях до измерительной платформы.

При этом оценивалась вероятность селекции сигнала подводного объекта на фоне сигнала буксировщика –  $P_c$  в зависимости от отношения С/П (таблица 1).

Кроме того, для демонстрации снижения индукции магнитного поля по мере удаления от поискового галса приводятся значения потенциальной (расчетной) дальности обнаружения –  $D_0$ , представляющей максимальное расстояние до объекта, на котором индукция магнитного поля спадает до заданных значений чувствительности датчика магнитного поля.

Таблица 1 – Основные характеристики динамики амплитуд индукции МП аварийного ОПА

$P_c$	1.0	0.9	0.8	0.5
$\sqrt{J}$	6.0	3.0	2.0	0
С/П	14.5	11.5	7.5	1.0
$D_0$ (м)	56	60	72	94

Таким образом, в зоне абсолютной вероятности обнаружения аварийного ОПА  $P_c = 1.0$ ;  $P_{co} = 0$  отношение  $C/\Pi$  превышает значение 14.5, в то время как в зоне неопределенности ( $P_c = 0.5$ ,  $P_{co} = 0.5$ ;  $C/\Pi = 1$ ) возникает риск пропуска ПО.

### **6. Статистическое обоснование чувствительности магнитометра при сохранении требуемых вероятностных характеристик обнаружения подводного объекта**

По данным анализа основных путей развития морских магнитометров выявлена устойчивая тенденция увеличения ширины полосы поиска за счет повышения чувствительности датчиков (до 0.01–0.0001 нТл), что влечет за собой нежелательное увеличение их массогабаритных характеристик и стоимости.

Поэтому представляет интерес анализ влияния чувствительности магнитометра на эффективную дальность обнаружения ПО в зависимости от требуемых вероятностных характеристик ( $P_c = 0.8–1.0$ ).

При этом под эффективной дальностью ( $D_э$ ) понимается расстояние от поискового галса до ПО с заданной вероятностью селекции полезного сигнала на фоне помехи.

Исследование динамики амплитудных значений индукции магнитного поля подводного объекта в полосе поиска проводилось с целью определения гарантированного значения вероятности обнаружения аварийного ОПА при использовании буксируемой ММС.

В процессе поиска по традиционной методике, когда ширина поисковой полосы ( $2D_0$ ) определяется чувствительностью датчика, нельзя исключить ситуацию, при которой ПО находится на краю полосы поиска, когда сигнал от буксировщика может быть воспринят как сигнал подводного объекта – ( $C/\Pi = 1$ ).

Необходимо определение степени реализации потенциальной чувствительности магнитометрических датчиков в условиях помехи буксировщика –  $K = D_э/D_0$ .

Проведена оценка отношения эффективной и потенциальной дальностей обнаружения подводного объекта (для значений чувствительности датчика – 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 нТл).

При этом оценивалась степень реализации потенциальной чувствительности магнитометрических датчиков в условиях помех буксировщика  $K = D_э/D_0$  в зависимости от требуемых вероятностных характеристик ( $P_c = 0.8...1.0$ ) обнаружения ПО (таблица 2, рисунок 3).

Таблица 2. Зависимость коэффициентов реализации чувствительности ММС от значений эффективной дальности обнаружения аварийного ОПА

Чувствительность ММС (нТл)	0.1	0.5	1.0	1.5
$K(0.8)$	0.53	0.76	1.11	1.31
$K(1.0)$	0.41	0.59	0.83	1.02

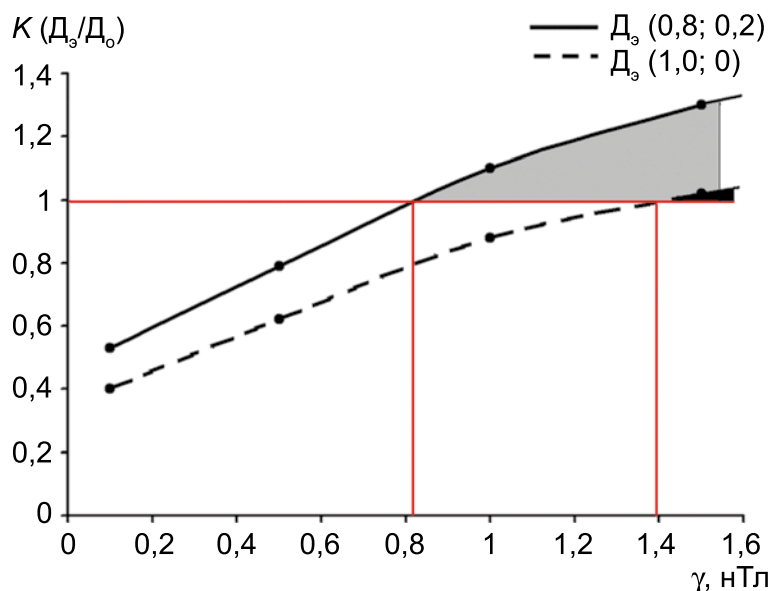


Рис. 3 – График зависимости  $K = D_{\gamma}/D_0$  от допустимых значений чувствительности ММС при требуемых вероятностных характеристиках обнаружения аварийного ОПА

Как показали исследования, существующая практика повышения ширины полосы поиска за счет увеличения чувствительности магнитометра и без учета требуемой вероятности обнаружения ПО (отношения уровней полезного сигнала и технических помех буксировщика ММС) – не вполне корректна (Семевский, Аверкиев, 2002).

Анализ приведенных данных показывает, что при поиске аварийного ОПА достаточными значениями чувствительности датчиков ММС (при сохранении требуемой вероятности обнаружения) могут быть 0,8 нТл (при  $P_c = 0,8$  и  $P_{\infty} = 0,2$ ) и 1,4 нТл (при  $P_c = 1,0$  и  $P_{\infty} = 0$ ).

Следует отметить, что допустимое уменьшение чувствительности ДМП позволило значительно снизить не только массогабаритные, но и стоимостные характеристики ММС.

Так, протонный магнитометр МР-02 чувствительностью 0,1 нТл имеет габариты 150×132×342 мм, а канадский Sea Spy с характеристиками: 0,01 нТл – 1200×127×127 мм.

При этом стоимость ММСкратно увеличивалась.

Для сравнения – габаритные характеристики отечественного микроферрозонда чувствительностью 1,0 нТл – 17×0,7×0,7 мм дают возможность иметь в одной гондоле два датчика магнитного поля в градиентометрическом режиме (Афанасьев, 2011).

Таким образом, использование методологических основ статистической магнитометрии позволило обосновать допустимое снижение чувствительности датчика магнитного поля, а также его массогабаритных и стоимостных характеристик с сохранением требуемой вероятности обнаружения подводного объекта.

## Заключение

1. Разработка современных магнитометрических средств оперативного поиска подводных объектов (затопленных судов с ЯЭУ, аварийных обитаемых подводных аппаратов, затопленных химических боеприпасов) при проведении экологических обследований и аварийно-спасательных работ требует гарантированного их обнаружения с повышенной вероятностью ( $P_c = 0.8–1.0$ ).

2. Использование основных положений статистической магнитометрии позволяет определить ширину рекомендованной полосы поиска ПО с гарантированными значениями вероятностных характеристик его обнаружения в терминах статистического расхождения альтернативных гипотез («сигнал–помеха»).

3. С использованием метода градации (условного деления) традиционной полосы поиска (расчетной полосы, полученной, исходя из чувствительности магнитометра) на уменьшенные полосы абсолютной ( $P_c = 1.0$ ), квазиабсолютной ( $P_c \geq 0.9$ ) и допустимой ( $P_c \geq 0.8$ ) вероятностей решена проблема гарантированного обнаружения экологически опасных и аварийных подводных объектов со значительным снижением ( $P_{\infty} \leq 0.1 – \leq 0.2$ ) или исключением ( $P_{\infty} = 0$ ) вероятностей их пропуска. При этом ширина рекомендуемой полосы поиска с гарантируемым обнаружением ПО уменьшается до 0.4–0.6 ширины традиционной.

4. Статистическое обоснование допустимого снижения чувствительности магнитометра позволяет гарантировать требуемую вероятность обнаружения подводного объекта в рекомендуемой полосе поискового галса.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № 0149-2021-0011) при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-05-60070).

## Список литературы

1. *Афанасьев М. С.* Перспективные технологии создания наноразмерных датчиков магнитных полей // Сборник трудов 12-й международной конференции «МСОИ-2011». М.: ИО РАН, 2011. Т. 2. С. 91–93.
2. *Колмогоров В. А.* Основные понятия теории вероятностей. М.: Наука, 1977. 119 с.
3. *Левин Б. Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Советское радио, 1975. 342 с.
4. *Нерсесов Б. А., Римский-Корсаков Н. А.* Проблема обнаружения химических боеприпасов в Балтийском море // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. СПб, 2021. Т. 14. № 2. С. 98–103.
5. *Нерсесов Б. А., Римский-Корсаков Н. А.* Результаты экологических исследований российских арктических морей // Российская Арктика. М., 2021. № 2 (13) С. 14–25.
6. *Нерсесов Б. А., Римский-Корсаков Н. А.* Статистическая магнитометрия // ФГБНУ «Аналитический центр» Министерства образования и науки РФ. М., 2020. 120 с.
7. *Семевский Р. Б., Аверкиев В. В., Яроцкий В. А.* Специальная магнитометрия. СПб: Наука, 2002. 232 с.



Нерсесов Б. А., Римский-Корсаков Н. А.

Статья поступила в редакцию 25.03.2022, одобрена к печати 12.07.2022.

**Для цитирования:** Нерсесов Б. А., Римский-Корсаков Н. А. Статистическое обоснование допустимого снижения чувствительности магнитометра при сохранении требуемой вероятности обнаружения подводного объекта // Океанологические исследования. 2022. Т. 50. № 2. С. 178–187. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(2\).9](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(2).9).

## STATISTICAL SUBSTANTIATION OF THE PERMISSIBLE DECREASE IN THE SENSITIVITY OF THE MAGNETOMETER WITH SAVING THE REQUIRED PROBABILITY OF DETECTING THE UNDERWATER OBJECT

**B. A. Nersesov, N. A. Rimsky-Korsakov**

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,  
e-mail: nba1940@yandex.ru*

The search for underwater potentially dangerous objects using towed magnetometric systems during environmental surveys and rescue operations does not lose its relevance. The existing practice of increasing their effectiveness by increasing the sensitivity of the magnetic field sensor (up to 0.01–0.0001 nT) entailed an increase in weight and size characteristics and cost. At the same time, the stochastic nature of the search process was not taken into account, leading to an indefinite signal-to-noise ratio associated with the random position of an underwater object in the search band, which led to its unacceptable omission. Therefore, the modern search for potentially dangerous underwater objects required their guaranteed detection with an increased probability. The developed methodology for using data from statistical analysis of the amplitude characteristics of the magnetic field induction of an underwater object (signal) and a towing vehicle (interference) makes it possible to determine the width of the guaranteed detection band. The values of the ratios of the average values of the amplitudes of their magnetometric signals, corresponding to the probabilistic characteristics of detection, depending on the values of the magnetic moments in the search band, are determined. Boundary conditions for zones of guaranteed detection of an underwater object with an increased probability  $P_c = 0.8–1.0$  are established in accordance with the level of “signal-to-interference” ratios. Taking into account the stochastic nature of the process of searching for an underwater object, a substantiation of the permissible sensitivity of the magnetometer was carried out, which leads to a decrease in its weight, size and cost characteristics without reducing the required detection probability.

**Keywords:** magnetometer, tugboat, underwater object, magnetic field sensor sensitivity, weight and size characteristics, detection probability, statistical justification

**Acknowledgments:** The work was carried out within the framework of the state task of the IO RAS (subject No. 0149-2021-0011) with partial support from the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-05-60070).

## References

1. Afanasiev, M. S., 2011: Promising technologies for creating nanoscale sensors of magnetic fields. *Proceedings of the 12th international conference "MSOI-2011"*. Moscow, IO RAS, **2**, 91–93.
2. Kolmogorov, V. A., 1977: *Basic concepts of probability theory*. Moscow, Nauka, 119 p.
3. Levin, B. R., 1975: *Theoretical Foundations of Statistical Radio Engineering*. Moscow, Soviet Radio, 342 p.
4. Nersesov, B. A. and N. A. Rimsky-Korsakov, 2021: The problem of detection of chemical munitions in the Baltic Sea. *Fundamental and Applied Hydrophysics*, Saint Petersburg, **14** (2), 98–103.
5. Nersesov, B. A. and N. A. Rimsky-Korsakov, 2021: Results of ecological studies of the Russian Arctic seas. *Russian Arctic*, Moscow, **2** (13), 14–25.
6. Nersesov, B. A. and N. A. Rimsky-Korsakov, 2020: *Statistical magnetometry*. FGBNU "Analytical Center" of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Moscow, 120 p.
7. Semevsky, R. B., V. V. Averkiev, and V. A. Yarotsky, 2002: *Special magnetometry*. Saint Petersburg, Nauka, 232 p.

Submitted 25.03.2022, accepted 12.07.2022.

**For citation:** Nersesov, B. A. and N. A. Rimsky-Korsakov, 2022: Statistical substantiation of the permissible decrease in the sensitivity of the magnetometer with saving the required probability of detecting the underwater object. *Journal of oceanological research*, **50** (2), 178–187, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(2\).9](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(2).9).