

## ОПТИМИЗАЦИЯ ДЛИНЫ БУКСИРОВОЧНОГО ТРОСА ПРИ ОПЕРАТИВНОМ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКОМ ПОИСКЕ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

**Нерсесов Б.А.**

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

Статья поступила в редакцию 01.04.2021, одобрена к печати 31.05.2021.

Одной из особенностей создания нового поколения средств морской магнитометрии является требование повышения оперативности поиска аварийных подводных объектов за счет обоснованного уменьшения длины буксировочного троса магнитометра, обеспечивающего снижение протяженности поискового галса. Традиционно длина кабель-троса буксируемого магнитометра определяется с учетом его чувствительности, а также магнитных характеристик судна-буксировщика и подводного объекта. При этом игнорируется стохастический характер поискового процесса, вызванного случайными факторами (неопределенным пространственным положением подводного объекта в полосе поиска, а также ориентационными помехами измерительной платформы). Новый подход к алгоритму обработки статистической информации магнитометрических сигналов подводного объекта и буксировщика в полосе поиска позволяет определить оптимальную длину буксировочного троса. При этом решается задача минимизации целевой функции зависимости двух альтернатив: с одной стороны – снижение помех буксировщика по мере увеличения длины буксировочного троса, с другой – увеличение ориентационных помех, вызванных пространственно-временными колебаниями магнитометра. Кроме того, оценка селекции сигнала подводного объекта на фоне помех буксировщика в терминах «статистического расхождения альтернативных гипотез» – дивергенции Кульбака – позволяет оптимизировать длину кабель-троса с заданными вероятностными значениями обнаружения подводного объекта.

**Ключевые слова:** длина буксировочного троса, подводный объект, буксировщик, магнитометр, вероятность обнаружения, оптимизация

### Введение

За последние годы получили развитие работы, связанные с поиском экологически опасных подводных объектов (затонувших судов, затопленных химических боеприпасов и ядерных отходов) в акваториях интенсивной хозяйственной деятельности, а также аварийно-спасательные подводные работы по обнаружению военных объектов (сверхмалой подводной лодки или вертолета).

При этом перспективными средствами мониторинга акватории являются морские магнитометрические системы (ММС).

Эти технические средства, являясь пассивными, с успехом используются для поиска подводных объектов (ПО) в условиях неэффективности гидроакустических средств: на мелководье, в любых средах (воде или донном грунте) и, главное, – на границах этих сред.

В зависимости от платформы расположения ММС подразделяются на мобильные (буксируемые или бортовые) и стационарные (береговые, донные).

Создание морских магнитометров, предназначенных для эффективного поиска подводных объектов, является сложной проблемой и связано с необходимостью решения множества научно-технических задач.

### 1. Специфика магнитометрического поиска подводных объектов

Тактика поиска экологически опасных и аварийных подводных объектов начинается с установления площади акватории их предполагаемого нахождения (рис. 1).

Анализ маршрута поискового маневрирования показывает, что, как правило, буксируемый магнитометр движется *по траектории ортогональных контргалсов* с заданными характеристиками: шириной полосы поиска, а также длиной поискового галса, определяемой длиной буксировочного троса.

При этом оперативность поиска определяется временем обследования акватории предполагаемого нахождения ПО, которое зависит от ширины полосы поиска, протяженности поискового галса и скорости буксировщика.

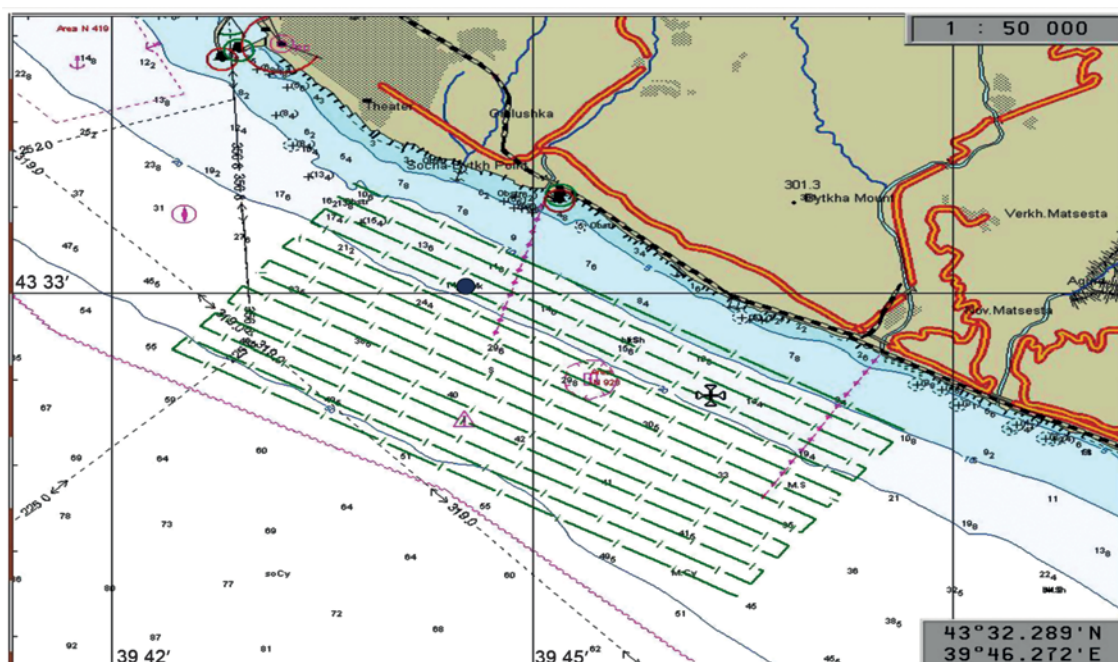


Рис. 1. Схема маршрута магнитометрического поиска подводного объекта в акватории Кавказского побережья

Характерной особенностью функционирования буксируемого магнитометра является прием магнитометрической системой сигналов подводного объекта и одновременно комплекса помех, вызванных: вариациями магнитного поля Земли, пространственно-временными колебаниями измерительной платформы и магнитным полем буксировщика (геомагнитной и ориентационной помехами, а также помехой буксировщика).

При этом отношение «сигнал – помеха» определяет дальность обнаружения ПО и не зависит от чувствительности датчика магнитного поля (ДМП).

Важным техническим решением, компенсирующим влияние геомагнитных помех, является переход от одиночного датчика к градиентометрической системе двух датчиков магнитного поля во встречном (дифференциальном) соединении, находящихся на некотором фиксированном расстоянии, называемом измерительной базой.

В современной магнитометрии отмечается тенденция увеличения дальности обнаружения ПО за счет повышения чувствительности магнитометра.

При этом длина кабель-троса определяется с учетом магнитных характеристик подводного объекта и судна-буксировщика и составляет 600–800 м (Семевский, Аверкиев, 2002).

Однако, как показали экспериментальные исследования, по мере увеличения длины буксировочного троса возрастает ориентационная помеха.

Подробно результаты характера такой зависимости приведены в статье (Нерсесов, Скрынников, 1997).

Одной из особенностей создания нового поколения средств морской магнитометрии является требование к повышению оперативности поиска аварийных подводных объектов за счет обоснованного уменьшения длины буксировочного троса ММС, определяющей снижение протяженности поискового галса (рис. 2).

Оценка вероятностных характеристик обнаружения подводных объектов средствами морской магнитометрии предполагает учет стохастического характера поискового процесса.

При этом главным требованием современных поисковых средств является вероятностная гарантия недопустимости пропуска подводного объекта в полосе поиска.

Однако традиционная методика определения полосы поиска и длины кабель-троса проводится без учета случайных факторов (неопределенного пространственного положения подводного объекта в полосе его поиска, а также ориентационных помех ММС), что приводит к недопустимым ошибкам обнаружения ПО.

Предложенная методология статистической магнитометрии позволяет обеспечить буксируемый поиск ПО с укороченным кабель-тросом. Причем с гарантированной вероятностью обнаружения искомого объекта (Нерсесов, Римский-Корсаков, 2020).

Кроме того, вероятностный подход к алгоритму обработки статистической информации магнитометрических сигналов подводного объекта и буксировщика

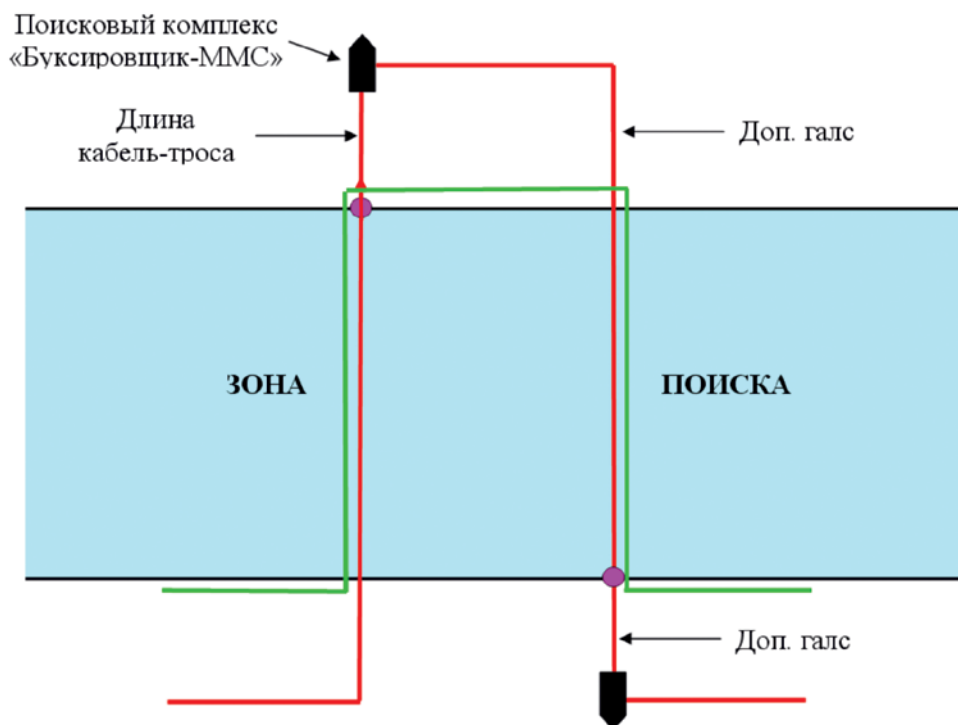


Рис. 2. Маршруты поискового маневрирования:  
 — при буксировке традиционным кабель-тросом  
 — при буксировке укороченным кабель-тросом

позволяет обосновать не только значительное уменьшение длины буксировочного троса, но и снижение протяженности поискового лага, а следовательно и времени поиска, что играет принципиальную роль при оперативном обнаружении аварийного подводного объекта.

## 2. Способы буксировки морского магнитометра и объекты обнаружения

Традиционно в качестве буксировщика ММС используются научно-исследовательские судна (НИС), производящие поиск ПО со скоростью 5–10 узлов на горизонте, зависящим от величины магнитного момента искомого объекта.

Как правило, при модуле магнитного момента судна 250 Эм<sup>3</sup> и чувствительности датчика 0,1 нТл, длина буксировочного троса, обеспечивающая минимальную помеху, составляет 630 м.

Однако использование маломагнитного (0,125 Эм<sup>3</sup>) буксировщика – моторной надувной лодки (МНЛ) «Посейдон» – (Б-2) позволяет значительно уменьшить сигнал помехи, сократив длину буксировочного троса.

Таким образом может быть значительно повышена оперативность поиска судовой и авиационной техники, затонувшей в результате катастрофы.

В настоящем исследовании в качестве подводных объектов магнитометрического поиска рассматривались: затонувшее судно ПО-1 (250 Эм<sup>3</sup>) и аварийный вертолет ПО-2 (2,5 Эм<sup>3</sup>).

При этом оптимизировались длины кабель-тросов буксировщиков НИС (Б-1) и МНЛ (Б-2), обеспечивающих заданную вероятность обнаружения ( $P = 0.9$ ) подводных объектов ПО-1 и ПО-2 в двух оперативных ситуациях: («Б-1 – ПО-1») и («Б-2 – ПО-2»).

В практике магнитометрического поиска часто используется градиентометрический способ, предполагающий буксировку двух магнитометров с фиксированной базой 10–50 м. Однако для данного способа буксировки характерно наличие больших ориентационных помех, что приводит к серьезным ошибкам обнаружения ПО (Семевский, Аверкиев, 2002).

Поэтому в качестве альтернативы чаще используются два магнитометра с жесткой базой 0.5–1.0 м.

Кроме того, перспективная миниатюризация датчиков магнитного поля открывает возможность размещения градиентометра в одном буксируемом контейнере (Нерсесов, Римский-Корсаков, 2020).

### **3. Выбор показателя оптимальной длины буксировочного троса – значения дивергенции Кульбака**

Оценка вероятностных характеристик обнаружения подводных объектов средствами морской магнитометрии при оптимизации длины буксировочного троса предполагает учет стохастического характера поискового процесса (Нерсесов, Римский-Корсаков, 2020).

Селективное правило теории принятия решений (Макаров, Виноградская, 1982), при обнаружении объекта на фоне внешних помех, предполагает максимизацию меры расхождения альтернативных гипотез «подводный объект – буксировщик ММС».

Отметим, что алгоритмы оценки длины буксировочного троса по критерию «статистического расхождения гипотез» предпочтительнее в случаях описания вероятностных моделей сигналов объекта и помехи нормальными законами распределения. Одним из критериев «статистического расхождения альтернативных гипотез» является дивергенция Кульбака (Кульбак, 1967).

Причем дивергенция Кульбака выгодно отличается от других критериев расхождения гипотез тем, что значительно упрощает алгоритм оценки селекции гипотез.

Для нормального закона показатель дивергенции как мера расхождения распределений «сигнал – помеха» при  $\sigma_c = \sigma_{\Pi} = \sigma$  определяется по формуле:

$$\sqrt{J} = \frac{(m_1 - m_2)}{\sigma}. \quad (1)$$

При этом средний уровень (математическое ожидание) амплитуды полезного сигнала ( $m_c$ ) определяется как:

$$m_c = m_{\Pi} + \sqrt{J} \sigma, \quad (2)$$

где  $m_c$  – среднее значение амплитуды сигнала ПО;  
 $m_n$  – среднее значение амплитуды помехи буксировщика;  
 $\sqrt{J}$  – показатель дивергенции гипотез «сигнал – помеха»;  
 $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение (СКО) сигнала, вызываемое эволюциями ММС.

Установлено (Нерсесов, Римский-Корсаков, 2020), что  $\sqrt{J}$  принимает значения 2, 4, 6, что соответствует вероятностным характеристикам обнаружения ПО 0.8; 0.9; 1.0.

В нашем случае показатель дивергенции «сигнал – помеха», обеспечивающий вероятность обнаружения объекта  $P_{по} = 0.9$ , составляет 4 (рис. 3).

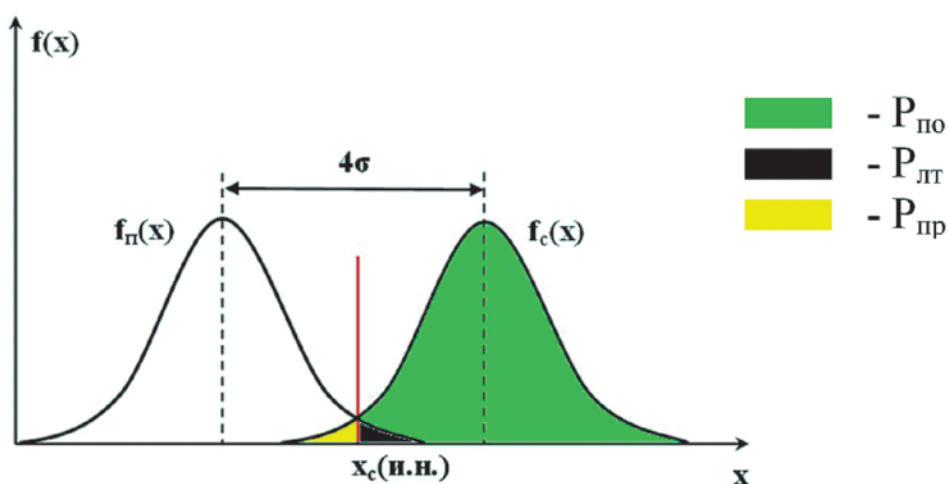


Рис. 3. Иллюстрация статистического расхождения гипотез, обеспечивающего вероятность обнаружения объекта  $P_{по} = 0.9$

Таким образом, оценка вероятности селекции сигнала объекта на фоне помех буксировщика в терминах дивергенции Кульбака позволяет установить граничные значения длины кабель-троса ММС с заданным значением  $P_{по}$ .

#### 4. Оптимизация длины кабель-троса в зависимости от магнитных характеристик ПО и буксировщика ММС, а также ее ориентационных помех

При оптимизации расстояния «буксировщик – ММС» решается задача минимизации целевой функции зависимости двух альтернатив: с одной стороны – снижение помех буксировщика по мере увеличения длины буксировочного троса, с другой – увеличение пространственно-временных колебаний измерительной платформы и, связанной с этим, ориентационной помехой.

В терминах математического анализа, оптимальным является экстремальное (максимальное или минимальное) значение непрерывной функции.

Согласно (Нерсесов, Римский-Корсаков, 2020), процедуре оптимизации длины кабель-троса предшествуют измерения и статистический анализ амплитудных характеристик магнитограмм подводного объекта и буксировщика на фиксированном удалении от ММС.

Таким образом, оптимальное расстояние «буксировщик – ММС» можно определить требуемым уровнем вероятности обнаружения ПО с учетом значений математических ожиданий полезного сигнала и сигнала помехи в полосе поиска, а также ориентационных помех ММС.

### 5.1. Оперативная ситуация «Б-1 – ПО-1»

На рис. 4 приведены зависимости математических ожиданий сигналов подводного объекта, помехи буксировщика и ориентационной помехи ММС от длины кабель-троса буксировщика Б-1 при поиске ПО-1 с заданной вероятностью его обнаружения  $P_{по} = 0.9$ .

Анализ приведенных данных позволяет обосновать оптимальную длину буксировочного троса равную 350 м, которая в 1.8 раз меньше традиционной – 630 м.

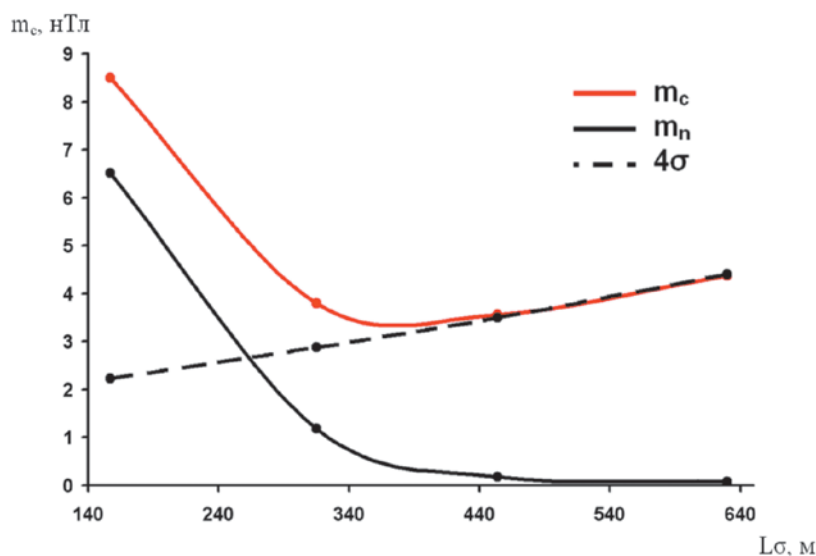


Рис. 4. График оптимизации длины буксировочного троса Б-1 при поиске ПО-1

### 5.2. Оперативная ситуация «Б-2 – ПО-2»

На рис. 5 приведены зависимости математических ожиданий сигналов объекта, помех буксировщика и помех, вызываемых эволюциями гондолы, от длины буксируемого троса Б-2 при поиске ПО-2 с заданной вероятностью его обнаружения  $P_{по} = 0.9$ .

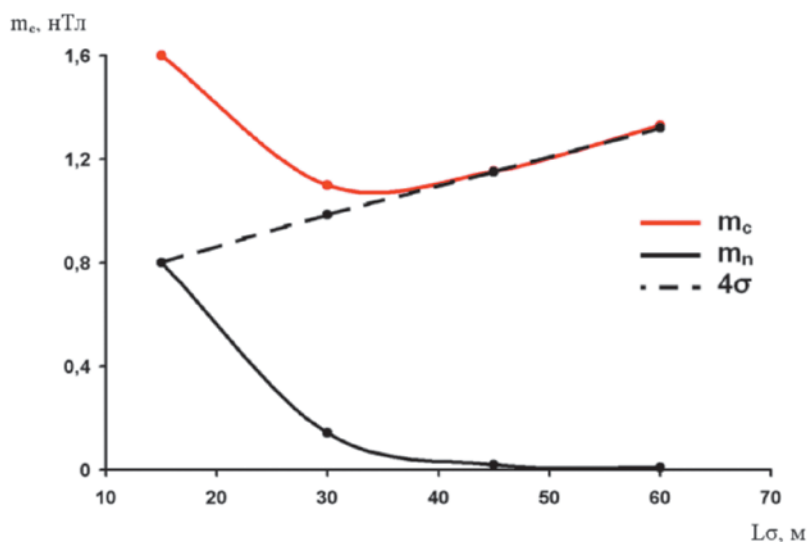


Рис. 5. График оптимизации длины буксировочного троса Б-2 при поиске ПО-2

Представленная зависимость математического ожидания сигнала ПО-2 от технических помех буксировщика и эволюций ММС позволяет определить оптимальную длину буксировочного троса равную 35 м, которой соответствует требуемое значение  $P_{по}$ .

### Заключение

При проведении подводных поисковых и аварийно-спасательных работ с использованием средств буксируемой магнитометрии значительное уменьшение длины кабель-троса и, следовательно, снижение протяженности поискового галса и времени оперативного обнаружения аварийного объекта является главной задачей.

Предложенная методология статистической магнитометрии позволяет обосновать буксируемый поиск ПО с укороченным кабель-тросом (Нерсесов, Римский-Корсаков, 2020).

Кроме того, статистический подход к алгоритму обработки информации магнитометрических сигналов подводного объекта и буксировщика позволяет обеспечить гарантированную вероятность обнаружения подводного объекта в полосе поиска, что играет принципиальную роль при оперативной организации аварийно-спасательных мероприятий.

Разработанный метод оптимизации длины кабель-троса при гарантированной вероятности обнаружения  $P_{по} = 0.9$  позволил:

- при использовании НИС в качестве судна-буксировщика ММС в процессе поиска затонувшего судна – уменьшить длину кабель-троса в 1.8 раз, и тем самым повысить оперативность поиска ПО, снизив длину поискового галса;

- при использовании МНЛ «Посейдон» в качестве буксировщика ММС при поиске аварийного вертолета определить оптимальную длину кабель-троса – 35 м.



## Литература

- Нерсесов Б.А., Римский-Корсаков Н.А.* Статистическая магнитометрия. М.: ФГБНУ «Аналитический центр» Министерство науки и высшей школы РФ, 2020. 126 с.
- Нерсесов Б.А., Скрынников Р.Г.* Подводный буксируемый магнитометр-градиентометр для поиска затонувших судов // Военная наука – городу: Тезисы докладов 1-й научной конференции, 20–23 мая 1997 г. Санкт-Петербург, 1997. С. 23–27.
- Кульбак С.* Теория информации и статистика. М.: Наука, 1967. 247 с.
- Макаров И.М., Виноградская Т.М.* Теория выбора и принятия решений. М.: Наука, 1982. 328 с.
- Семевский Р.Б., Аверкиев В.В.* Специальная магнитометрия. СПб: Наука, 2002. 232 с.

## OPTIMIZATION OF THE LENGTH OF THE TOWING CABLE IN THE OPERATIONAL MAGNETOMETRIC SEARCH OF UNDERWATER OBJECTS

**Nersesov B.A.**

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

Submitted 01.04.2021, accepted 31.05.2021.

One of the features of the creation of a new generation of marine magnetometry means is the requirement to increase the efficiency of the search for emergency underwater objects due to a reasonable reduction in the length of the magnetometer towing cable, which ensures a decrease in the length of the search tack. Traditionally, the length of the cable-rope of a towed magnetometer is determined taking into account its sensitivity, as well as the magnetic characteristics of the vessel-tug and underwater object. At the same time, the stochastic nature of the search process is ignored, caused by random factors (the uncertain spatial position of the underwater object in the search strip, as well as the orientation noise of the measuring platform). A new approach to the algorithm for processing the statistical information of the magnetometric signals of the underwater object and the towing vehicle in the search bar makes it possible to determine the optimal length of the towing cable. In this case, the problem of minimizing the objective function of the dependence of two alternatives is solved: on the one hand, a decrease in the towing noise as the tow cable length increases, on the other, an increase in the orientation noise caused by the spatio-temporal oscillations of the magnetometer. In addition, the evaluation of the selection of the signal of the underwater object against the background of the towing vehicle interference in terms of the "statistical discrepancy of alternative hypotheses" – the Kullback divergence, makes it possible to optimize the length of the cable-rope with the given probabilistic values of the detection of the underwater object.

**Keywords:** tow rope length, underwater object, towing vehicle, magnetometer, detection probability, optimization

## References

- Nersesov, B.A. and N.A. Rimsky-Korsakov, 2020: *Statistical magnetometry*. FSBSI "Analytical Center" Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Moscow, 126 p.
- Nersesov, B.A. and R.G. Skrynnikov, 1997: Underwater towed magnetometer-gradiometer for searching for sunken ships. *Military science for the city*: Abstracts report 1st All Russia scientific conf. May 20–23, 1997, St. Petersburg, 23–27.
- Kulbak, S., 1967: *Information Theory and Statistics*. Moscow, Nauka, 247 p.
- Makarov, I.M. and T.M. Vinogradarskaya, 1982: *Theory of choice and decision-making*. Moscow, Nauka, 328 p.
- Semevcky, R.B. and V.V. Averkiev, 2002: *Special magnetometry*. St. Petersburg, Nauka, 232 p.