

УДК [534.873 : 004.94] : 519.863

© В. И. Ермолаев\*, А. В. Михальчук

АО «СПИИРАН-НТБВТ», 199178, 14 линия ВО, д. 39, г. Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: viktor.ermolaev@mail.ru

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В УСЛОВИЯХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СРЕДЫ

Статья поступила в редакцию 02.03.2021, после доработки 30.05.2021

Конкретизируются существующие методические подходы к практическому использованию океанологических данных в интересах организации применения гидроакустических средств при ведении поиска района, характеризующихся высокой изменчивостью среды. На основе анализа публикаций, посвященных описанию систем оперативной океанологии, сформированы количественные характеристики их выходных параметров, являющихся исходными данными для решения задач оптимизации применения гидроакустических средств. Сформулирована общая постановка задачи оптимального управления гидроакустическими средствами в условиях пространственно-временной изменчивости среды. Приведено решение задачи оптимального управления с использованием метода районирования и математического аппарата теории поиска. Показана роль и место систем гидроакустических расчетов при решении задачи оптимизации. В качестве методического подхода предложено использование объема зон наблюдения как универсального параметра, характеризующего интегральную оценку влияния среды, параметров и режимов работы гидроакустических средств на их возможности. Приведен пример, иллюстрирующий методические подходы к оптимизации применения гидроакустических средств при решении задачи поиска подвижным наблюдателем в океанском районе с высокой пространственно-временной изменчивостью. Сделаны выводы о возможности распространения приведенных в статье методических подходов на решение задачи оптимизации применения гидроакустических средств группы подвижных наблюдателей, а также на решение задачи оптимизации скрытности действий наблюдателя в условиях пространственно-временной изменчивости среды. В заключении приводятся рекомендации по построению программных и программно-аппаратных средств, обеспечивающих решение прикладных задач, использующих данные оперативной океанологии.

**Ключевые слова:** гидроакустические средства, дальность действия, модель среды, расчетная сетка, районирование, поиск, эффективность, оптимизация.

© V. I. Ermolaev\*, A. V. Mikhailchuk

SPIIRAS-HTR&DO Ltd. 199178, 14-th Linia, VI, No. 39, St. Petersburg, Russia

\*E-mail: viktor.ermolaev@mail.ru

## OPTIMIZATION OF SONAR APPLICATION UNDER SPATIOTEMPORAL VARIABILITY ENVIRONMENT

Received 02.03.2021, in final form 30.05.2021

The article concretizes the existing methodological approaches to the practical application of oceanological data in areas characterized by high environmental variability during the search by sonars. Quantitative characteristics of the operational oceanology output parameters are formed, based on the analysis of publications devoted to their description. These parameters are taken as initial data for solving optimization tasks. The general statement of the optimal control of sonars in the conditions of spatial and temporal environment variability problem is formulated. The solution of the optimal control problem using the zoning method and the mathematical apparatus of the search theory is given. The role and place of hydroacoustic calculation systems in solving the optimization problem is shown. The volume of the observation zone is proposed for use as a universal parameter characterizing the influence of the environment on the sonar efficiency. An example is given illustrating methodological approaches to optimizing the sonars in solving the search problem by a mobile observer in an ocean area with high spatial and temporal variability. Conclusions are drawn about the possibility of extending the methodological approaches given in the article to optimize

Ссылка для цитирования: Ермолаев В.И., Михальчук А.В. Оптимизация применения гидроакустических средств в условиях пространственно-временной изменчивости среды // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14, № 3. С. 35–46. doi: 10.7868/S2073667321030035

For citation: Ermolaev V.I., Mikhailchuk A.V. Optimization of Sonar Application under Spatiotemporal Variability Environment. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2021, 14, 3, 35–46. doi: 10.7868/S2073667321030035

sonars located on several mobile observers, as well as to solve the problem of optimizing the secrecy of the observer's actions in the conditions of spatial and temporal variability of the environment. In conclusion, recommendations for the construction of software and hardware-software tools that provide the solution of applied problems using operational oceanology data are given.

**Key words:** sonar, range of action, environment model, calculation grid, zoning, search, efficiency, optimization.

## 1. Введение

Гидроакустические средства играют важную роль в мониторинге обстановки, формировании и поддержании в актуальном состоянии объектово-координатных данных об объектах, действующих в пределах обширных районов Мирового океана. Эффективность этих средств в значительной мере определяется свойствами среды в районах их функционирования. Современный этап развития отечественной и зарубежной океанологии как источника данных о среде характеризуется интенсивным развитием. Это связано прежде всего с внедрением современных технологий организации измерений, обработки и доведения до потребителей океанологических данных. Дистанционное зондирование океана из космоса, регулярные наблюдения с свободнодрейфующих и заякоренных буев с оперативной передачей наблюдений через ИСЗ позволяют с использованием современной цифровой техники, численных моделей океанических процессов и методов ассимиляции наблюдений создавать системы анализа и прогноза морской среды, аналогичные метеорологическим системам прогноза погоды. Океанографические системы, объединяющие источники данных о среде, каналы передачи и модели обработки этих данных дают возможность представлять в удобной форме непрерывную эволюцию океанических полей и использовать их для организации наблюдения с помощью гидроакустических средств. В настоящее время такие океанографические системы, или системы оперативной океанологии, функционируют в 10-ти странах. Проблемные вопросы создания элементов таких систем и прикладного использования океанологических данных активно обсуждаются в отечественной научной литературе [1—5]. Анализ отечественных [1—9] и иностранных [10—13] публикаций, посвященных описанию систем оперативной океанологии и их элементов, позволяет сформировать осредненные значения их тактико-технических характеристик:

а) пространственный охват:

- в горизонтальной плоскости — глобальный, региональный, локальный;
- в вертикальной плоскости — от поверхности до дна;

б) горизонтальное разрешение:

- в глобальном масштабе —  $1/4^\circ \dots 1/12^\circ$ ;
- в региональном масштабе —  $1/12 \dots 1/36^\circ$ ;
- в локальных прибрежных районах —  $1/30^\circ$  и меньше;

в) вертикальное разрешение — в верхнем слое — 1—10 м, всего 30—50 слоев;

г) период осреднения данных измерений — от 6 до 24 ч;

д) заблаговременность прогноза — в зависимости от масштаба системы от 10 до 2 сут;

е) периодичность обновления прогноза — 1—4 раза в сутки.

Выходными данными океанографических систем являются оперативные или прогнозные оценки геопространственных данных, характеризующих поля температуры, солености, скорости звука, поверхностного волнения водной среды в районе функционирования гидроакустических средств. Использование этих данных позволяет перейти от климатических к оперативным и прогнозным данным на этапе планирования наблюдения и от точечных к сеточным данным — в динамике непосредственного выполнения задач наблюдателем. Достаточно подробный анализ подходов к использованию океанологических данных в интересах организации применения гидроакустических средств изложены в отечественных работах [1—3, 14]. В частности, в статье [1] перечислены причины, по которым задача контроля среды является актуальной, приводится перечень параметров, подлежащих контролю, требования к периодичности и точности контроля этих параметров. В статье [2] сформулированы основные задачи, на решение которых ориентировано «сопряжение» океанологии и акустики:

- улучшение поисковых возможностей за счет текущего оценивания условий распространения акустических волн, оптимизации режимов работы, совершенствования тактики применения сил и средств;
- повышения скрытности собственной платформы, путем выбора режимов движения и оптимизации маневрирования в пространстве;
- совершенствование самих гидроакустических средств путем адаптации к условиям распространения акустических волн.

Кроме того, в [2] описываются общие подходы к решению перечисленных задач. В работе [14] приведен ряд алгоритмов, связанных с оптимизацией маневрирования носителя гидроакустических средств в текущих, либо в заданных условиях среды, не привязанных к расчетной сетке. Из иностранных публикаций, посвященных данной проблематике, следует отметить работы [15–17].

Целью настоящей статьи является конкретизация имеемых в настоящее время методических подходов к практическому использованию океанологических данных в интересах организации применения гидроакустических средств при поиске районов, характеризующихся высокой изменчивостью среды (в части математической постановки задачи, обоснования выбора математических методов и описания алгоритмов ее решения).

## 2. Постановка задачи

Представим модель среды в районе функционирования гидроакустических средств в виде регулярной расчетной сетки, в узлах которой, в общем случае, состояние среды уникально. Расчетная сетка описывается матрицей  $\mathbf{X}$  следующим образом:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{1,1} \dots x_{1,j} \dots x_{1,n} \\ \dots \dots \dots \\ x_{j,1} \dots x_{j,i} \dots x_{j,n} \\ \dots \dots \dots \\ x_{m,1} \dots x_{m,i} \dots x_{m,n} \end{bmatrix}, x_{i+1,j} = x_{i,j} + \Delta_x, x_{i,j+1} = x_{i,j} + \Delta_y, \Delta_x = \Delta_y = \text{const}. \quad (1)$$

Обозначим  $\mathbf{x} = x_{i,j}$  – координаты узла расчетной сетки в пространстве  $R^2$ . Пусть в каждом узле расчетной сетки определен вектор  $\mathbf{G}_{i,j} = \mathbf{G}_x$ , характеризующий состояние среды в этом узле  $\mathbf{G}_x = [g_{1,x}, g_{2,x}, \dots, g_{n,x}]^T$ , где  $n$  – количество параметров среды, определяющих возможности гидроакустических средств. Элементами вектора  $\mathbf{G}_x$ , в общем случае, являются параметры, характеризующие:

- гидрофизические условия (ветровое волнение, гидролого-акустические условия, глубина моря, тип грунта, пространственное затухание акустической энергии);
- помехи среды, обусловленные волнением, сейсмичностью, судоходством.

Множество векторов  $\mathbf{G}_x$  в узлах расчетной сетки обозначим как множество состояний среды  $\mathbf{G}$ :

$$\mathbf{G} = \{\mathbf{G}_{i,j}\} = \{\mathbf{G}_x\}, i \in n, j \in m. \quad (2)$$

Процесс управления гидроакустическим средством, функционирующим в районах, характеризующихся пространственно-временной изменчивостью среды, представим в виде управления объектом, движение которого описывается системой уравнений изменения фазовых координат  $\mathbf{x}(t_k)$  на множестве  $\mathbf{X}$  в дискретные моменты времени  $t_k$ :

$$\mathbf{x}(t_k) = f[\mathbf{x}(t_{k-1}), u(t_k)], \mathbf{x}(t_k) \in \mathbf{X}, t_k \in [0, T], k = 1, \dots, K, u(t_k) \in \mathbf{U} \quad (3)$$

в результате реализации определенных управляющих воздействий  $u(t_k)$ , входящих в некоторое множество  $\mathbf{U}$  в узлах расчетной сетки, которые обеспечивают решение гидроакустическим средством задачи наблюдения с эффективностью  $W(u)$  не менее заданного порогового значения  $W_3(u)$ :

$$W(u) \geq W_3(u) \quad (4)$$

или экстремального значения:

$$W(u) \rightarrow \max \text{ или } W(u) \rightarrow \min. \quad (5)$$

Тогда задача оптимального управления гидроакустическими средствами конкретизируется как задача пошагового выбора координат узлов расчетной сетки  $\mathbf{x}(t_k)$ , и реализации управляющих воздействий в этих узлах –  $u(t_k)$ , с учетом особенностей среды –  $\mathbf{G}_x$ , обеспечивающих выполнение требований к эффективности решения задач наблюдения –  $W(u)$ .

## 3. Методы решения задачи оптимального управления

Общая постановка задачи, приведенная выше, может быть конкретизирована с учетом ограничений, определяемых особенностями задач, решаемых наблюдателем. Здесь следует выделить две группы ограничений.

Первая группа предполагает, что заданы начальные  $\mathbf{x}(t_0)$  и конечные  $\mathbf{x}(t_K)$  фазовые координаты управляемого объекта. Такие задачи относятся к классу задач оптимального управления дискретно-управляемым

объектом с закрепленными концами [18]. Решение данных задач предполагает обоснование такого управления объекта, которое обеспечивает его перевод из начального состояния в конечное с учетом достижения экстремального, в зависимости от решаемой задачи, значения функционала:

$$W(u) = \sum_{k=1}^K w(t_k) \rightarrow \max, \quad (6)$$

$$W(u) = \sum_{k=1}^K w(t_k) \rightarrow \min, \quad (7)$$

где  $w(t_k)$  – значение эффективности решения задачи на  $k$ -м шаге управления.

Задачи первой группы относятся к группе задач маршрутизации, и их решение связано с применением различных методов, описанных в [18], основным из которых является метод динамического программирования.

Следует отметить работу [19], в которой представлены различные варианты решения задачи маршрутизации, в том числе с использованием генетических алгоритмов.

Вторая группа задач относится к классу задач управления дискретно-управляемым объектом с подвижными концами. Эта группа характеризуется неизвестными

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \mathbf{x}_0 \in \mathbf{X}, \quad (8)$$

$$\mathbf{x}(t_K) = \mathbf{x}_K, \mathbf{x}_K \in \mathbf{X}. \quad (9)$$

Решение такой задачи предполагает поиск начальных  $\mathbf{x}_0$  и конечных  $\mathbf{x}_K$  координат. При этом на  $\mathbf{x}_0$  и  $\mathbf{x}_K$  накладываются ограничения, связанные с эффективностью  $w$  в этих узлах:

$$\mathbf{x}_0 : w_0 \rightarrow \max(w_x), x \in \mathbf{X}, \quad (10)$$

$$\mathbf{x}_K : w_K \rightarrow \min(w_x), x \in \mathbf{X}, \quad (11)$$

а для фазовых координат накладываются ограничения, связанные с соотношением эффективности решения задачи наблюдения в соседних временных отсчетах  $w_k$  и  $w_{k+1}$ :

$$w_{t_k} \geq w_{t_{k+1}}, k = 0, \dots, K - 1. \quad (12)$$

Это ограничение связано с необходимостью обеспечить оптимизацию применения гидроакустических средств по двум видам критериев эффективности – вероятностных и временных [20–22]. Задачи второй группы относятся к задачам поиска с использованием гидроакустических средств в условиях изменчивости среды. Решение таких задач обеспечивается комбинированным применением разнообразных математических методов, в частности методов теории обнаружения сигналов, методов расчета акустических полей, методов исследования операций и методов теории поиска.

Далее рассматриваются методические подходы к решению задач второй группы.

#### 4. Решение задачи оптимального управления гидроакустическими средствами

В приведенной постановке решение задачи управления целесообразно производить с использованием метода районирования [23], который предполагает разбиение множества векторов состояния среды  $\mathbf{G}$  на части, в каждой из которой оптимально определенное управляющее воздействие. Районирование является обратной задачей параметрического программирования, в которой аргументом является управляющее воздействие, а функцией – часть множества векторов состояния среды, в которой это воздействие оптимально. Рассмотрим решение задачи для варианта оптимизации функционирования гидроакустического средства в районе, характеризующемся пространственной изменчивостью среды.

Пусть множество управляющих воздействий  $\mathbf{U}$  включает подмножество  $\mathbf{F}$  режимов работы гидроакустического средства и подмножество  $\mathbf{M}$ , характеризующее маневрирование наблюдателя в координатах  $x, y, z$ , обеспечивающее оптимальные условия применения этого средства в интересах достижения целей наблюдения (поиска):

$$\mathbf{U} = \{\mathbf{F}, \mathbf{M}\}, \mathbf{F} = \{F_1 \dots F_i \dots F_N\}, \mathbf{M} = \{x, y, z\}. \quad (13)$$

На первом этапе решения задачи производится районирование, обеспечивающее разбиение множества состояния среды  $\mathbf{G}$  на подмножества эффективного применения различных режимов гидроакустического средства (подмножества режимов):

$$\mathbf{G}_1^N, \mathbf{G}_2^N \dots \mathbf{G}_i^N \dots \mathbf{G}_n^N, i \in N, \mathbf{G}_i^N \subset \mathbf{G}. \quad (14)$$

Нижний индекс подмножества характеризует номер режима, а верхний – общее количество возможных режимов работы средства.

Районирование должно производиться в пространстве  $R^2$ . Для того чтобы обеспечить это условие, управляющее воздействие, характеризующее маневрирование наблюдателя  $\mathbf{M}$  условно разделяется на маневрирование в пространстве  $R^2$  (в координатах  $x, y$ ) и в пространстве  $R^1$  (по координате  $z$ ). Это позволяет в пространстве  $R^2$  сформировать множества  $\mathbf{G}_i^N$ , характеризующие эффективность  $w_x(F_i)$  каждого  $i$ -го режима работы средства в узлах при оптимальном управлении по координате  $z$ . Так, для отдельно выбранного узла с координатами  $x = x_{i,j}$  оптимальное значение  $z_i$ , в пределах диапазона  $\mathbf{Z}$ , для режима  $F_i$  определяется следующим образом:

$$z_i : w_x(u) = \max(w_x(F_i, z)), F_i \in \mathbf{F}, z \in \mathbf{Z}, i \in N, x \in \mathbf{X}. \quad (15)$$

Далее для каждого узла определяется вариант действий  $F_0$  (режим работы гидроакустических средств), обеспечивающий экстремальное значение показателя эффективности:

$$F_0 : w_x(u) = \max(w_x(\mathbf{F}, z)), F_0 \in \mathbf{F}; x \in \mathbf{X}, z = z_i. \quad (16)$$

Показатель эффективности  $w_x(F)$  должен удовлетворять следующим требованиям. Во-первых, он должен быть связан с вектором состояния среды  $\mathbf{G}_x$ , во-вторых, должен быть чувствительным к режимам функционирования гидроакустических средств, и, в-третьих, – отражать процесс поиска-обнаружения объекта наблюдения в узлах расчетной сетки. Таким показателем является интенсивность поиска –  $\gamma$ . Перечисленные требования к этому показателю реализуются, с одной стороны, через его входные параметры, характеризующие возможности гидроакустических средств в конкретных условиях среды, а с другой – непосредственным влиянием этого показателя на показатели более высокого уровня – поисковую производительность, вероятность и математическое ожидание времени обнаружения объекта в операции поиска [20–22]. Как показано в [22], интегральную оценку влияния среды, параметров и режимов работы гидроакустических средств на их возможности целесообразно производить через объем  $V_x$  зоны наблюдения, вычисленный по ее внешнему контуру. Параметр  $V_x$  определяется площадью зоны наблюдения  $S_x(z)$  на заданной глубине  $z$ , плотностью вероятности  $q(z)$  и диапазоном глубин  $h_{\min}, h_{\max}$  нахождения объекта наблюдения:

$$V_x = \int_{h_{\min}}^{h_{\max}} S_x(z)q(z)dz. \quad (17)$$

В свою очередь,  $S_x(z)$  зависит от дальности обнаружения объекта наблюдения на заданном курсовом угле  $d_x^z(\varphi)$  наблюдателя и плотности вероятности  $q(\varphi)$  курсовых углов вхождения объекта поиска в зону наблюдения:

$$S_x(z) = \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} d_x^z(\varphi)q(\varphi)d\varphi. \quad (18)$$

Для вычисления  $d_x^z(\varphi)$ , как правило, используются системы гидроакустических расчетов [14, 24], входные параметры которых чувствительны к пространственно-временным параметрам среды и параметрам, характеризующим потенциал гидроакустических средств. Современные системы гидроакустических расчетов, как правило, используют модель двумерно-неоднородной среды [25–28], характеризующейся переменными по трассе распространения акустического сигнала рельефом и геоакустическими характеристиками дна, а также гидролого-акустическими условиями водной толщи. Сопряжение системы гидроакустических расчетов с океанологической системой и получение данных о среде оперативного или прогностического характера обеспечивают оценку эффективности гидроакустических средств в пределах района поиска с параметрами (пространственным охватом, разрешением, периодом осреднения, заблаговременностью и периодичностью обновления прогноза), определяемыми типом океанологической системы – глобальной, региональной или локальной. Необходимо отметить, что пространственно-временному изменению подвержены только два входных параметра системы гидроакустических расчетов – вертикальное распределению скорости звука и волнение водной поверхности. Остальные параметры, характеризующие среду (глубина моря, рельеф и геоакустические характеристики дна, коэффициент пространственного затухания) имеют только пространственную зависимость. Степень влияния перечисленных выше факторов среды на эффективность

гидроакустических средств различна и зависит от способа обследования пространства средством (активного, пассивного, активно-пассивного), а также технических параметров, определяющих его энергетический потенциал (типа и размеров антенн, частоты излучаемого сигнала, частотного диапазона приемного канала, способов и алгоритмов обработки сигналов и т. п.).

Обозначим  $\gamma_x$  – интенсивность поиска в узле  $\mathbf{x}$ , при использовании в этом узле оптимального режима  $F_0$  работы гидроакустических средств:

$$\gamma_x = w_x(F_0). \quad (19)$$

Узлы, в которых  $\gamma_x > 0$ , и в которых одноименные режимы по эффективности превосходят или равны эффективности других режимов, объединяются в подмножества слабого доминирования режимов (подмножества эффективного применения режимов гидроакустического средства) –  $\mathbf{G}_1^N, \dots, \mathbf{G}_i^N, \dots, \mathbf{G}_n^N$ . Узлы расчетной сетки, в которых  $\gamma_x = 0$ , объединяются в подмножество  $\mathbf{G}_0^N$  неэффективного применения гидроакустического средства, функционирующего в различных режимах. Проведенное таким образом районирование обеспечивает оптимальное управление гидроакустическим средством при его нахождении в любом узле расчетной сетки. Кроме того, результатом такого районирования является формирование значений эффективности средств  $\gamma_x$ , в результате оптимизации их функционирования в узлах расчетной сетки. Однако этого недостаточно для оптимизации решения задачи поиска в целом, т. е. выработки траектории движения на множестве  $\mathbf{X}$ . Поэтому далее, используя  $\{\gamma_x\}$ , производится разбиение множества векторов состояния среды  $\mathbf{G}$  на подмножества  $\mathbf{G}_i^P$ , характеризующие различную степень влияния среды на эффективность решения задач поиска в узлах расчетной сетки, то есть на подмножества эффективности поиска.

$$\mathbf{G}_0^P, \mathbf{G}_1^P, \mathbf{G}_2^P, \dots, \mathbf{G}_i^P, \dots, \mathbf{G}_p^P, i \in \overline{0, P}, \mathbf{G}_i^P \subset \mathbf{G}. \quad (20)$$

Нижний индекс подмножеств в выражении (20) характеризует номер подмножества, а верхний – общее количество подмножеств, на которое разбивается множество  $\mathbf{G}$ .

В общем случае формируются следующие подмножества эффективности:

- подмножество узлов, в которых параметры среды обеспечивают высокую эффективность применения гидроакустических средств –  $\mathbf{G}_1^P$ ;
- подмножества узлов, характеризующихся промежуточными значениями эффективности применения гидроакустических средств –  $\mathbf{G}_2^P, \dots, \mathbf{G}_i^P, \dots, \mathbf{G}_{p-1}^P$ ;
- подмножество узлов, характеризующихся низкой эффективностью применения гидроакустических средств –  $\mathbf{G}_p^P$ ;
- подмножество узлов, характеризующихся неэффективным применением гидроакустических средств –  $\mathbf{G}_0^P$ .

Очевидно, что при наличии узлов, в которых  $\gamma_x > 0$  точность решения задачи зависит от количества  $P$  подмножеств, на которое разбивается множество  $\mathbf{G}$ .

Формирование перечисленных выше подмножеств направлено на решение двух задач. Во-первых, обеспечивает определение начальных  $\mathbf{x}_0$  и конечных  $\mathbf{x}_K$  координат поиска:

$$\mathbf{x}_0 : w_x(u) = \max(\gamma_x), \mathbf{x}_0 \in \mathbf{G}_1^P, \mathbf{x} \in \mathbf{G}_1^P, \quad (21)$$

$$\mathbf{x}_K : w_x(u) = \min(\gamma_x), \mathbf{x}_K \in \mathbf{G}_p^P, \mathbf{x} \in \mathbf{G}_p^P. \quad (22)$$

Во-вторых, позволяет обосновать последовательность и время поиска на участках, ограниченных подмножествами  $\mathbf{G}_1^P, \mathbf{G}_2^P, \dots, \mathbf{G}_i^P, \dots, \mathbf{G}_p^P$ . Для сокращения временных показателей эффективности поиска [22] участки с высокой эффективностью применения гидроакустических средств, определяемые  $\mathbf{G}_1^P$ , подлежат обследованию в первую очередь, участки, характеризующиеся узлами с промежуточными значениями эффективности  $\mathbf{G}_2^P, \dots, \mathbf{G}_i^P, \dots, \mathbf{G}_{p-1}^P$  – во вторую. Завершается поиск на участке с низкой эффективностью применения гидроакустических средств, определяемые подмножеством  $\mathbf{G}_p^P$ . На участках неэффективного применения гидроакустических средств –  $\mathbf{G}_0^P$  поиск не производится. В пределах участков, перечисленных выше, за исключением участка, определяемого  $\mathbf{G}_0^P$ , выбор фазовых координат производится с учетом требований выражения (12), а управление режимами – с учетом выражений (14)–(16).

Рассмотренные выше методические подходы раскрывают процесс управления гидроакустическими средствами в условиях пространственной изменчивости среды. Временная изменчивость характеризуется зависимостью вектора состояния среды от времени  $\mathbf{G}_x(t_i)$ . Учет временного фактора обеспечивается циклическим применением описанной выше методики при изменении параметров среды. При этом за начальное значение фазовых координат принимается их текущее значение на момент изменения свойств среды  $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_i$ , а конечное значение фазовых координат  $\mathbf{x}_K$  подлежит пересчету. Учитывая дискретный характер формирования данных

о среде океанологической системой глобального и регионального масштаба, такой подход к учету временной изменчивости может быть применен как при планировании поиска, так и при корректуре имеющегося плана при предоставлении наблюдателю оперативных данных, отличных от ранее сформированного прогноза.

**Пример оптимизации применения гидроакустических средств в условиях пространственно-временной изменчивости среды.** Для моделирования выбран океанский район, площадь которого равна 9749 миль<sup>2</sup>. Координаты района: Ш = 72°42'54"С, Д = 15°27'03"В, Ш = 73°54'40"С, Д = 21°59'56"В, Ш = 71°50'37"С, Д = 22°17'04"В, Ш = 71°25'16"С, Д = 16°52'45"В. В районе действует подвижный наблюдатель, осуществляющий поиск подводного объекта в течение 72 ч с помощью гидроакустического средства, функционирующего в двух режимах: «Режим 1» и «Режим 2». Средство реализует алгоритмы оптимальной обработки узкополосных сигналов шумящих объектов в инфразвуковом («Режим 1») и широкополосных сигналов в звуковом («Режим 2») диапазонах частот.

На район наложена регулярная расчетная сетка размером  $NГ \times NВ$ , соответствующая пространственному масштабу данных, формируемых глобальной системой оперативной океанологии. Расстояние между узлами расчетной сетки  $\Delta_x = \Delta_y = 20$  миль. Сезон – март. Условия среды в узлах расчетной сетки представлены матрицами рис. 1–4.

$1.424 \times 10^3$	358	243	148	137	222	380
882	435	368	292	326	461	482
525	478	464	435	465	459	449
503	440	421	416	405	439	437
518	418	367	363	383	405	405
675	402	368	367	352	323	322
$1.09 \times 10^3$	292	305	301	301	390	355
$1.179 \times 10^3$	505	290	267	247	300	340
$1.64 \times 10^3$	$1.248 \times 10^3$	262	224	213	230	320

Рис. 1. Матрица глубин, м.

Fig. 1. Depth matrix, m.

3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3
1	3	3	3	3	3	3
1	1	3	3	3	3	2
4	1	1	3	3	2	2
4	4	1	1	3	2	2
4	4	1	1	3	2	2
4	4	1	1	3	2	2

Рис. 2. Матрица типов грунтов (1 – песок, камень; 2 – илистый песок; 3 – песчаный ил; 4 – ил, глина).

Fig. 2. Soil types matrix (1 – sand, stone; 2 – silty sand; 3 – sandy silt; 4 – silt, clay).

2	3	2	1	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3
2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	2	2	2
3	4	3	3	2	2	2
4	4	3	3	3	2	2
4	4	3	3	3	3	2

Рис. 3. Матрица ветрового волнения моря (баллы).

Fig. 3. Wind waves matrix (points).

2	2	2	1	1	1	2
2	2	2	2	4	3	2
2	2	2	2	2	2	2
1	1	2	2	2	2	2
1	1	2	2	2	2	2
1	1	2	2	2	2	2
1	2	2	2	4	2	2
1	2	2	2	2	2	2
5	2	2	5	2	2	2

Рис. 4. Матрица гидроакустических условий (семизначная типизация).

Fig. 4. Hydroacoustic conditions matrix (seven-digit typing).

Параметры пространственного затухания акустической энергии являются частотно-зависимыми и определяются для выбранного района выражениями:

а) для режима, функционирующего в инфразвуковом диапазоне частот:

$$\beta(f) = 0.11f^2 / (1 + f^2) + 0.011f^2, \quad (23)$$

б) для режима, функционирующего в звуковом диапазоне частот:

$$\beta(f) = (0.00165 + 0.0263 \cdot f^{1.45}). \quad (24)$$

Помехи среды, обусловленные сейсмичностью, во всех узлах сетки имеют одинаковые значения и соответствуют сейсмичности 1 балл. При моделировании принято допущение о том, что помехи среды, обусловленные судоходством, во всех узлах соответствуют интенсивности «редкое».

При проведении моделирования использовались программы расчета акустического поля и зон наблюдения гидроакустических средств, описанные в [27, 28].

Результаты компьютерного моделирования приведены на рис. 5–9 (рис. 7 – см. вклейку).

На фрагменте таблицы, изображенной на рис. 9, номерам столбцов соответствуют следующие данные: б/н – номер узла расчетной сетки; 0 – тип гидролого-акустических условий; 1 – глубина залегания первого

<i>a</i>	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>б</i>
0	0	0	0
0	13.188	0.488	11.652
0	13.188	0.488	0.488
0	36.978	1.538	0.505
0	36.978	1.538	16.112
0	0	0	14.957
0	0	0	14.957
0	0	0	14.957
0	0	0	0
0	0	0	0

Рис. 5. Матрица объемов зон наблюдения (*a* – «Режим 1», *б* – «Режим 2»).

Fig. 5. Observation zones volumes matrix (*a* – “Mode 1”, *b* – “Mode 2”).

<i>a</i>	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>б</i>
0	0	0	0
0	31.926	0	23.746
0	31.926	31.926	0
0	53.46	33.549	0
0	53.46	0	27.924
0	0	0	26.905
0	0	0	26.905
0	0	0	26.905
0	0	0	0
0	0	0	0

Рис. 6. Матрицы эффективности применения гидроакустических средств (миль<sup>2</sup>/ч) (*a* – высокой эффективности, *б* – низкой эффективности).

Fig. 6. Sonars efficiency matrices (mile<sup>2</sup>/h) (*a* – high efficiency, *b* – low efficiency).



0	0	0	0	0	0	0	0
0	"РЕЖ-1"	"РЕЖ-2"	"РЕЖ-2"	"РЕЖ-2"	"РЕЖ-1"	0	0
0	"РЕЖ-1"	"РЕЖ-1"	"РЕЖ-1"	"РЕЖ-1"	"РЕЖ-1"	0	0
0	"РЕЖ-1"	"РЕЖ-1"	"РЕЖ-1"	"РЕЖ-1"	"РЕЖ-1"	0	0
0	"РЕЖ-1"	"РЕЖ-2"	"РЕЖ-2"	"РЕЖ-2"	"РЕЖ-1"	0	0
0	0	"РЕЖ-2"	"РЕЖ-2"	"РЕЖ-2"	"РЕЖ-2"	0	0
0	0	"РЕЖ-2"	"РЕЖ-2"	"РЕЖ-2"	"РЕЖ-2"	0	0
0	0	"РЕЖ-2"	"РЕЖ-2"	"РЕЖ-2"	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 8. Матрица эффективных режимов.

Fig. 8. Effective modes matrix.

	0	1	2	3	4	5	6
0	2	150	0	0	40	170	0
1	2	150	0	0	40	170	0
2	2	120	0	0	40	140	0
3	1	0	0	0	40	0	0
4	1	0	0	0	40	0	0
5	1	0	0	0	40	0	0
6	2	150	0	0	40	170	0
7	2	200	0	0	40	220	0
8	2	150	0	0	40	170	0
9	2	100	0	0	40	120	0
10	2	100	0	0	40	120	0

Рис. 9. Фрагмент таблицы оптимальных значений глубин.

Fig. 9. Fragment of the optimal depth values table.

горизонта скачка скорости звука (ГСС-1); 2 – глубина залегания подводного звукового канала (ПЗК); 3 – глубина залегания второго горизонта скачка скорости звука (ГСС-2); 4 – первое рекомендованное значение  $z$ ; 5 – второе рекомендованное значение  $z$ ; 6 – третье рекомендованное значение  $z$ .

Результаты расчетов параметров управления:

- начальная точка поиска  $x_0$  – узел № 22, конечная точка  $x_K$  – узел № 46;
- площадь участка высокой эффективности применения ГАС (участок № 1) – 4403 миль<sup>2</sup>;
- площадь участка низкой эффективности применения ГАС (участок № 2) – 5346 миль<sup>2</sup>;
- последовательность поиска – «участок № 1» – «участок № 2»;
- время поиска в пределах участка № 1 – 26.6 ч;
- время поиска в пределах участка № 2 – 45.4 ч.

### 5. Заключение

Произведенные в статье исследования позволили конкретизировать имеющиеся в настоящее время методические подходы к практическому использованию океанологических данных в интересах организации применения гидроакустических средств при поиске районов, характеризующихся высокой изменчивостью среды. Предложенный алгоритм решения задачи позволяет количественно обоснованно организовать применение гидроакустических средств подвижного наблюдателя при решении им задач поиска объектов в условиях пространственно-временной изменчивости среды. Алгоритм может быть распространен на решение задачи организации поиска несколькими подвижными носителями. Кроме того, с использованием предложенных подходов возможно решение обратной задачи – повышение скрытности подвижного носителя, путем выбора режимов его движения и оптимизации маневрирования в пространстве.

Результаты математического моделирования позволяют сформулировать ряд рекомендаций, связанных с практической реализацией методов и алгоритмов оптимизации. Во-первых, проведение достаточно большого объема вычислений целесообразно производить с помощью программно-аппаратных комплексов, объединяющих высокопроизводительные вычислительные средства и программное обеспечение. Такие программно-аппаратные комплексы должны обеспечивать автоматизацию процессов получения оперативных данных о среде от внешних источников, основными из которых являются системы оперативной океанологии, подготовки исходных данных моделирования, проведения вычислений, вывода, хранения и архивации результатов расчетов. Во-вторых, специальное программное обеспечение должно позволять обрабатывать и манипулировать геопространственными данными, производить разнообразные гидроакустические расчеты и взаимодействовать с различными базами данных, в том числе с климатическими базами данных, характеризующими параметры среды в любом районе Мирового океана. Разработка программных и программно-аппаратных средств, удовлетворяющих перечисленным требованиям возможно на программных платформах, описанных в [29]. Создание таких средств будет способствовать повышению эффективности решения задач подводного наблюдения в условиях пространственно-временной изменчивости среды.

## Литература

1. *Машошин А.И.* Оперативная океанология в интересах применения гидроакустических средств ВМФ // Морская радиоэлектроника. 2020. № 4(74). С. 2—4.
2. *Коваленко В.В.* Информационно-управляющие системы в задачах подводного наблюдения и обеспечения скрытности объектов // Информационно-управляющие морские системы. 2019. № 1(15). С. 10—25.
3. *Коваленко В.В.* Океанологическое обеспечение распределенных систем подводного наблюдения // Информационно-управляющие морские системы. 2016. № 2(10). С. 68—79.
4. *Семенов Е.В.* Состояние и развитие гидродинамических моделей в интересах ВМФ. М. : ИО РАН, 2008. 32 с.
5. *Семенов Е.В.* Состояние и развитие гидродинамических моделей океана // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2008. № 1. С. 48—62.
6. *Реснянский Ю.Д., Зеленко А.А.* Развитие моделей и методов анализа данных наблюдений для мониторинга и прогнозирования крупномасштабных процессов в океане // Сб. статей 80 лет Гидрометцентру России. М. : Триада, 2010. С. 350—375.
7. *Ашик И.М.* Численные расчеты и прогнозы колебаний уровня, течений и дрейфа льда на шельфе морей Западного сектора Арктики // Навигация и гидрография. 1997. № 4. С. 85—94.
8. *Григорьев А.В., Кубряков В.А., Чариков И.В., Зацепин А.Г.* Численное моделирование динамики вод Российской зоны Черного моря // Тр. Международной конференции «Потоки и структуры в жидкостях: физика геосфер». Владивосток, 2011. С. 271—274.
9. *Корчагин Н.Н., Монин А.С.* Мезоокеанология. М. : Институт океанологии им. П.П. Ширшова, 2004. 176 с.
10. *Metzger E.J., Smedstad O.M., Thoppil P.G. et al.* US Navy operational global ocean and Arctic ice prediction systems // Oceanography. 2014. V. 27(3). P. 32—43. doi: 10.5670/oceanog.2014.66
11. *Rowley C., Mask A.* Regional and coastal prediction with the Relocatable Ocean Nowcast/Forecast System // Oceanography. 2014. V. 27(3). P. 44—55. doi: 10.5670/oceanog.2014.67
12. *Peloquin R.A.* The Navy ocean modeling and prediction program – from research to operations: an overview // Oceanography. 1992. V. 5(1). P. 4—8.
13. *Burnett W., Harper S., Preller R., Jacobs G., LaCroix K.* Overview of operational ocean forecasting in the US Navy: past, present, and future // Oceanography. 2014. V. 27(3). P. 24—31. doi: 10.5670/oceanog.2014.65
14. *Машошин А.И.* Задачи, решаемые системой гидроакустических расчетов // Морская радиоэлектроника. 2015. № 2(52). С. 40—45.
15. *Wenyu Cai, Meiyang Zhang, Yahong Rosa Zheng.* Task assignment and path planning for multiple autonomous underwater vehicles using 3D dubins curves // Sensors. 2017. N17 (7), 1607. doi: 10.3390/s17071607
16. *Yiheng Wang, Yahong Rosa Zheng.* 3-Dimensional path planning for autonomous underwater vehicle // Proc. Ocean's. 2018. IEEE/MTS. P. 1—6. doi: 10.1109/OCEANS.2018.8604783
17. *Chandler H.A., Alfonso K.J.* GRASP: an object-oriented approach to sonar performance modelling and tactical ASW search planning // Proc. IEEE/MTS Ocean's 2002 Conference. doi: 10.1109/OCEANS.2002.1191851
18. *Беленький А.С.* Исследование операций в транспортных системах: идеи и схемы методов оптимизации планирования. М. : Мир, 1992. 582 с.
19. *Тарасян В.С., Полушкин А.Я.* Оптимизация пути в неоднородной среде // Фундаментальные исследования. 2017. № 10—2. С. 296—300.
20. *Коопман В.О.* Theory of search: 3. The optimum distribution of searching efforts // Operation Research. 1956. V. 4, N 5.
21. *Хеллман О.* Введение в теорию оптимального поиска. М. : Наука, 1985. 245 с.
22. *Ermolaev V., Potapichev S.* Geoinformational support of search efforts distribution in changing environmental conditions // Proc. IF&GIS'2017. Shanghai, 2017. P. 153—164.
23. *Динер И.Я.* Исследование операций. Л. : ВМОЛЮА, 1969. 605 с.
24. *Марасев С.В., Машошин А.И.* Система гидроакустических расчетов гидроакустического комплекса подводной лодки // Тр. конф. УМАС-2014. СПб. : ОАО «Концерн «Электронприбор», 2014. С. 37—43.
25. *Авилов К.В.* Псевдодифференциальные параболические уравнения распространения звука в океане, плавно неоднородном по горизонтали, и их численное решение // Акустический журнал. 1995. Т. 41, вып. 1. С. 5—12.
26. *Avilov K., Popovich V., Ermolaev V., Leontiev Y., Zinyakov Y., Korolenko K., Popov O.* Sound propagation modeling on intelligent GIS base // Proc. UAM-2009. Naflion Greece, 2009. P. 22—27.
27. *Попович В.В., Ермолаев В.И., Леонтьев Ю.Б., Смирнова О.В.* Моделирование гидроакустических полей на основе интеллектуальной геоинформационной системы // Искусственный интеллект и принятие решений. 2009. № 4. С. 37—44.

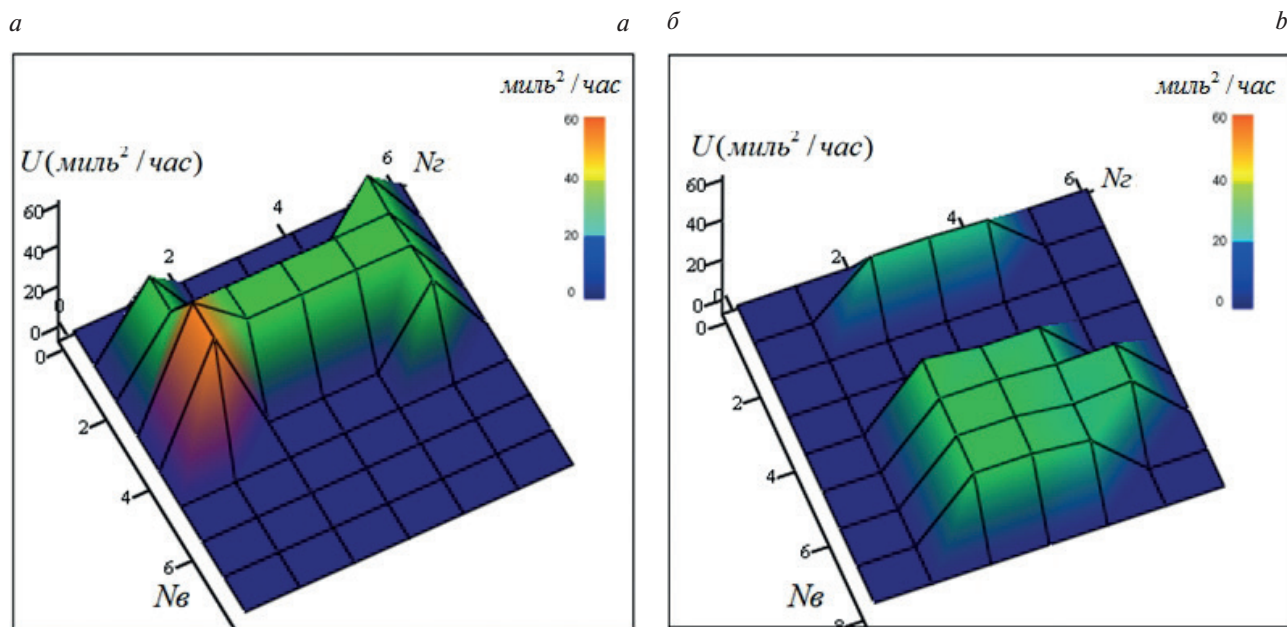
28. Popovich V., Leontiev Y., Ermolaev V., Chirov D., Smirnova O. 3D+t acoustic fields modelling based on intelligent GIS // Coordinates. 2015. N 2. P. 18–22.
29. Интеллектуальные географические информационные системы для мониторинга морской обстановки / Под общ. ред. чл.-кор. РАН Р.М. Юсупова и д-ра техн. наук В.В. Поповича. СПб. : Наука, 2013. 283 с.

## References

1. Mashoshin A.I. Operational oceanology in the interests of the use of hydroacoustic means of the Navy. *Morskaya Radioelektronika*. 2020, 4 (74), 2–4 (in Russian).
2. Kovalenko V.V. Information and control systems in the tasks of underwater surveillance and ensuring the secrecy of objects. *Informacziionno-Upravlyayuschiye Morskiye Sistemy*. 2019, 1(15), 10–25 (in Russian).
3. Kovalenko V.V. Oceanological support of distributed underwater surveillance systems. *Informacziionno-Upravlyayuschiye Morskiye Sistemy*. 2016, 2 (10), 68–79 (in Russian).
4. Semenov E.V. State and development of hydrodynamic models in the interests of the Navy. *Moscow, IO RAS*, 2008. 32 p. (in Russian).
5. Semenov E.V. State and development of hydrodynamic models of the ocean. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2008, 1, 48–62 (in Russian).
6. Resnyansky Yu.D., Zelenko A.A. Development of models and methods for analyzing observational data for monitoring and forecasting large-scale processes in the ocean. *Proc. 80 Years of the Hydrometeorological Center of Russia. Moscow*, 2010, 350–375 (in Russian).
7. Ashik I.M. Numerical calculations and forecasts of fluctuations in the level, currents and ice drift on the shelf of the seas of the Western sector of the Arctic. *Navigacziya i Gidrografiya*. 1997, 4, 85–94 (in Russian).
8. Grigoriev A.V., Kubryakov V.A., Charikov I.V., Zatsepin A.G. Numerical modeling of water dynamics in the Russian Black Sea zone. *Proc. International Conference “Flows and Structures in Liquids: Physics of Geospheres”*. Vladivostok, 2011, 271–274 (in Russian).
9. Korchagin N.N., Monin A.S. Mesooceanology. *Moscow, Shirshov Institute of Oceanology RAS*, 2004. 176 p. (in Russian).
10. Metzger E.J., Smedstad O.M., Thoppil P.G. et al. US Navy operational global ocean and Arctic ice prediction systems. *Oceanography*. 2014, 27(3), 32–43. doi: 10.5670/oceanog.2014.66
11. Rowley C., Mask A. Regional and coastal prediction with the relocatable ocean nowcast/forecast system. *Oceanography*. 2014, 27(3), 44–55. doi: 10.5670/oceanog.2014.67
12. Peloquin R.A. The Navy ocean modeling and prediction program – from research to operations: an overview. *Oceanography*. 1992, 5(1), 4–8.
13. Burnett W., Harper S., Preller R., Jacobs G., LaCroix K. Overview of operational ocean forecasting in the US Navy: past, present, and future. *Oceanography*. 2014, 27(3), 24–31. doi: 10.5670/oceanog.2014.65
14. Mashoshin A.I. Problems solved by the system of hydroacoustic calculations. *Morskaya Radioelektronika*. 2015, 2(52), 40–45 (in Russian).
15. Wenyu Cai, Meiyang Zhang, Yahong Rosa Zheng. Task assignment and path planning for multiple autonomous underwater vehicles using 3D dubins curves. *Sensors*. 2017, 17(7), 1607. doi: 10.3390/s17071607
16. Yiheng Wang, Yahong Rosa Zheng. 3-Dimensional path planning for autonomous underwater vehicle. *Proc. Ocea’s 2018 IEEE/MTS*. 2018, 1–6. doi: 10.1109/OCEANS.2018.8604783
17. Chandler H.A., Alfonso K.J. GRASP: An object-oriented approach to sonar performance modelling and tactical ASW search planning. *Proc. IEEE/MTS Ocean’s 2002 Conference*. doi: 10.1109/OCEANS.2002.1191851
18. Belenky A.S. Operations research in transportation system: ideas and schemes of optimizat to planning methods. *Moscow, Mir*, 1992. 582 p (in Russian).
19. Tarasyan V.S., Polushkin A.Ya. Optimization of the path in an inhomogeneous environment. *Fundamentalniye Issledovaniya*. 2017, 10–2, 296–300 (in Russian).
20. Koopman B.O. Theory of search: 3. The optimum distribution of searching efforts. *Operation Research*. 1956, 4, 5.
21. Hellman O. An introduction to the theory of optimal search. *Moscow, Nauka*, 1985. 245 p. (in Russian).
22. Ermolaev V., Potapichev S. Geoinformational support of search efforts distribution in changing environmental conditions. *Proc. IF&GIS’2017. Shanghai*, 2017, 153–164.
23. Diner I. Operational research. *Leningrad, Naval Academy*, 1969. 605 p. (in Russian).
24. Marasev S.V., Mashoshin A.I. System of hydroacoustic calculations of the hydroacoustic complex of a submarine. *Proc. UMAS-2014. St. Petersburg*. 2014, 37–43 (in Russian).
25. Avilov K.V. Pseudodifferential parabolic equations of sound propagation in the slowly range-dependent ocean and their numerical solutions. *Akusticheskij Zhurnal*. 1995, 41, 1, 5–12 (in Russian).

26. Avilov K., Popovich V., Ermolaev V., Leontiev Y., Zinyakov Y., Korolenko K., Popov O. Sound propagation modeling on intelligent GIS base. *Proc. UAM-2009. Naflion Greece*, 2009, 22—27.
27. Popovich V., Ermolaev V., Leontiev Y., Smirnova O. Modelling of gidroacoustic fields based on Intelligent GIS. *Iskusstvennyj Intellect i Prinyatie Resheniy*. 2009, 4, 37—44 (in Russian).
28. Popovich V., Leontiev Y., Ermolaev V., Chirov D., Smirnova O. 3D+t acoustic fields modelling based on intelligent GIS. *Coordinates*. 2015, 2, 18—22.
29. Intelligent geographical information systems for monitoring systems of marine situation / Ed. by R.M. Yusupov and V.V. Popovich. *St. Petersburg, Nauka*, 2013. 283 p. (in Russian).

К статье *Ермолаев В.И., Михальчук А.В.* Оптимизация применения гидроакустических средств в условиях пространственно-временной изменчивости среды  
*Ermolaev V.I., Mikhalchuk A.V.* Optimization of sonar application under spatiotemporal variability environment



**Рис. 7.** Трехмерное представление участков различной эффективности гидроакустических средств (*a* – высокой эффективности, *б* – низкой эффективности).

**Fig. 7.** Three-dimensional representation of areas characterized by different sonars efficiency (*a* – high efficiency areas, *b* – low efficiency areas).