

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. - Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. – 416 с.
2. Кобяков Ю.С., Кудрявцев Н.Н., Тимошенко В.И. Конструирование гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры. – Л.: Судостроение, 1986. – 287 с.
3. Орлов Л.В., Шабров А.А. Гидроакустическая аппаратура рыбопромыслового флота. – Л.: Судостроение, 1987. – 222с.
4. Смаришев М.Д. Направленность гидроакустических антенн. – Л.: Судостроение, 1973. – 275 с.

**Кириченко Игорь Алексеевич**

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге

E-mail: [igork@fep.tsure.ru](mailto:igork@fep.tsure.ru)

347928, Россия, г. Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, д. 44

Тел.: 8 (8634)-37-17-95

**Пивнев Петр Петрович**

E-mail: [pivnev@land.ru](mailto:pivnev@land.ru).

**Kirichenko Igor Alekseevich**

Taganrog Institute of Technology - Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education "Southern Federal University"

E-mail: [igork@fep.tsure.ru](mailto:igork@fep.tsure.ru)

44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia, Ph.: +7(8634)-37-17-95

**Pivnev Petr Petrovich**

E-mail: [pivnev@land.ru](mailto:pivnev@land.ru)

УДК 681.883

**В. И. Короченцев, Е. М. Титов**

**НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ  
ПРИ ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ШЕЛЬФА<sup>1</sup>**

*Целью работы является повышение точности навигации подводных аппаратов, измеряющих переменные физические поля в шельфовой зоне океана. Решены задачи управления подводным аппаратом по изолиниям магнитного поля, рельефу и слоистой структуре дна. Разработан математический алгоритм, позволяющий учитывать сферичность акустических волн навигационных эхолотов. Проведены натурные эксперименты, которые показали эффективность предложенной математической модели.*

*Навигация; подводный аппарат; физические поля; коэффициент отражения; цифровая карта; эксперимент.*

---

<sup>1</sup> Исследования проведены при поддержке гранта РФФИ-08-01-99034.

V.I. Korochenshev, E.M. Titov

**NAVIGATING MAINTENANCE OF UNDERWATER ROBOTS  
AT ECOLOGICAL MONITORING**

*The work purpose is increasing the accuracy of navigation of underwater vehicles, measuring the variable physical fields in the ocean shelf zone. Problems of management by an underwater vehicle on magnetic field isolines, a relief and layered structure of a bottom are solved. A mathematical algorithm that allows to take into account the sphericity of acoustic waves navigational echosounders. Natural experiments, which have shown efficiency of the offered mathematical model, are made.*

*Navigation; underwater vehicle; physical fields; coefficient of reflection; digital map; experiment.*

Для повышения эффективности экологического мониторинга водных районов измерительные датчики можно помещать на подводных аппаратах. При этом навигационное обеспечение подводных работ имеет решающее значение для успешного выполнения миссии точного измерения параметров водной толщи и морского дна. Особое значение подводные аппараты приобретают при измерении физических полей для прогноза катастрофических подводных событий природного и техногенного характера: землетрясения, цунами, тайфуны. Во время и после катастрофических событий использование необитаемых подводных аппаратов также является эффективным средством мониторинга.

Рассмотрены проблемы навигации подводных объектов, перемещающихся вблизи грани раздела моря с морским дном и атмосферой. Основным требованием на подводные объекты, рассматриваемые в статье, является их малогабаритность с высокой информативностью канала передачи сигналов связи и управления. Такими объектами могут быть автоматизированные подводные аппараты, автономные измерительные датчики физических полей, радиогидроакустические буи, антенны [1].

Проблемы управления такими объектами рассмотрены в многочисленных публикациях. При этом наиболее полно проблемы акустической навигации и связи подводных аппаратов рассмотрены в монографии [2]. Описанные системы навигации подводных аппаратов с длинной, короткой и ультракороткой базой позволяют успешно решать задачи поиска затонувших объектов и проводить различные научно-исследовательские работы.

Следует отметить способы навигации по акустическим картам рельефа дна моря. Известные методы навигации не позволяют разместить большие объемы информации о микрорельефе дна в ограниченном объеме малогабаритных подводных объектов. При этом оказывается необходимым разработать новые методы ориентации в пространстве подводных объектов, позволяющие разместить максимальное количество навигационной информации в ограниченном объеме электронных блоков.

Построение навигационных карт предполагает измерение аномалий физических полей различной природы в «привязке» к географическим координатам. Аномалии полей могут быть измерены различными датчиками: акустическими, магнитными, гравитационными, электрическими. В соответствии с измеренными аномалиями можно построить соответственно карты акустических, магнитных, гравитационных, электрических аномалий.

В одних районах океана наиболее информативны карты рельефа дна, в других – магнитные, в третьих районах – электрические поля и т. п. Выбор оптимальных, с точки зрения скорости обработки навигационной информации, физических полей является большим резервом для построения новых малогабаритных подводных аппаратов и систем.

Для построения цифровых карт аномалий геофизических полей необходимо выполнить несколько процедур физических измерений в реальных морских условиях. Результаты измерений содержат избыточную информацию, которую не обязательно использовать для построения цифровых карт аномалий. После фильтрации результатов измерений и выделения необходимых для навигации признаков объем информации в цифровой карте, по сравнению с первичными наблюдениями, может быть уменьшен на несколько порядков. Именно этот уменьшенный объем информации вводится в блок навигации малогабаритного подводного аппарата или объекта. Предлагаемый подход позволяет значительно увеличить площадь подводного навигационного района, размещенного в заданном ограниченном объеме памяти навигационного блока подводного объекта.

Проблемы построения карт рельефа в оптическом диапазоне известны и получили достаточное освещение в научной литературе.

Особого внимания требуют принципиальные сложности построения карт с помощью акустических волн. У большинства навигационных систем управление и связь под водой проектируются с использованием упругих волн.

Главная особенность построения карт по акустическим неоднородностям по сравнению с оптическим диапазоном заключается в сферичности волн, излучаемых и принимаемых гидроакустическими датчиками. Электромагнитные волны оптического диапазона значительно меньше размера микрорельефа отражающей поверхности. Поэтому модель коэффициентов отражения (соответственно, и построения карт), которая не изменяется от дистанции между подводным объектом и дном (поверхностью земли), может быть построена для плоских волн. Другими словами, карта рельефа дна (поверхности земли) будет одинакова для различных высот объекта навигации над поверхностью раздела сред.

Длина акустических волн, используемых при построении карт, может находиться в диапазоне от десятков сантиметров до единиц метров. Эта длина соизмерима с высотой нахождения подводного объекта над грунтом (от единиц до сотен метров). Очевидно, здесь сферичность волн нельзя пренебрегать. Одна карта, снятая для одной высоты объекта, будет выглядеть по-другому на различных высотах. Построение карт на малых длинах волн (от 1 мм до 1 см) позволяет использовать модель плоских волн с высотой объекта над дном не более нескольких десятков метров, что существенно снижает эффективность и производительность работы подводных аппаратов и систем.

Кроме проблем сферичности, на малых высотах над грунтом проявляются слабо изученные аномальные эффекты отражения и преломления волн от дна океана. Такие эффекты проявляются на углах отражения, превышающих критический угол. При этом грунтом поглощается более 30 % акустической энергии волн, что значительно превышает значение, указанное классической теорией.

Построение карт коэффициента отражения сферических волн от поверхности раздела двух сред предложено проводить по следующему алгоритму.

В блок памяти навигационного блока можно ввести не результаты вычисленного коэффициента отражения волн, а некоторый математический эквивалент этого измерения. Указанный показатель представляет собой некоторую «квазикарту» коэффициента отражения, которая не зависит от высоты аппарата над грунтом.

Поставим задачу оценивания. Пусть движение автономного подводного аппарата (АПА) описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\dot{z} = A(t)z(t) + e(t), \quad z(0) = e(0), \quad (1)$$

где  $z$  – вектор состояния системы размерности  $N$ ,  $e(t)$  – неизвестный вектор возмущений,  $A(t)$  – известная матрица размерности  $N \times N$ . Наряду с моделью (1) имеется вектор  $y(t)$ , характеризующий зависимость измерений от вектора состояния системы. Пусть измерения линейно зависят от вектора состояния

$$y = H(t)z(t) + s(t), \quad (2)$$

где  $y$  – вектор измерений размерности  $M$ ,  $H(t)$  – матрица размерности  $M \times N$ , вектор  $s(t)$  представляет собой ошибки измерений.

Поставим задачу поиска оптимальной в некотором смысле оценки вектора  $z$  по данным измерений  $y$ . При этом конкретный смысл критерия оптимальности получаемой оценки, а также точная формализация характеристик возмущений  $y(t)$  и ошибок измерений  $s(t)$  определяют способ построения алгоритма оценивания. Классическим подходом является гипотеза о случайном характере ошибок измерений и возмущений с нормальной плотностью распределения и задания среднеквадратического критерия качества. При этом для систем вида (1), (2) удастся получить в явном виде решение задачи оценивания вектора состояния системы. Однако в общем случае не удастся гарантировать выполнение требуемых условий, в частности, возмущения в модели (1) могут иметь неслучайную природу, а вероятностные характеристики ошибок измерений могут быть известны не полностью. Иным способом получения оценок является гарантирующий (минимаксный) подход, сущность которого состоит в интерпретации всех неконтролируемых факторов, включая и случайные, для которых характеристики (моменты) точно не известны, как неопределенных факторов, в которых известными являются лишь диапазоны их изменения, или, более точно, некоторые предельные (доверительные множества). При этом оптимальная стратегия оценивания определяется как гарантирующая достижение наилучшего результата при наихудшем сочетании неопределенных факторов. Если при этом доверительное множество неопределенных факторов выбрать априори так, что его вероятностная мера будет не ниже заданной, то минимаксная стратегия управления будет гарантировать достижение результата с такой же вероятностью.

Для построения системы навигации целесообразно использовать структурную схему следующего вида – рис. 1. Основу системы составляет блок базовой навигационной системы (БНС), в качестве которой могут быть использованы инерциальная либо доплеровская навигационная система. Результатом работы базовой навигационной системы являются оценки текущего местоположения подводного аппарата, величин скорости, угла курса и других параметров с некоторыми погрешностями, определяющими область неопределенности параметров.

В заданной области коррекции текущие оценки местоположения используются для получения прогноза о величине измеряемого параметра геофизического поля по цифровой эталонной карте (ЦЭК). Действительные показания датчика геофизического поля (ДГП) сравниваются с этим прогнозом, и их разность обрабатывается блоком фильтрации (БФ) для формирования вектора ошибок БНС. Через контур обратной связи производится компенсация ошибок БНС. Данный процесс повторяется при движении аппарата по траектории, обеспечивая непрерывную корректировку. В блоке фильтрации используется минимаксный фильтр калма-

новского типа либо эллипсоидальный фильтр, вычисляющий гарантированную оценку параметров движения подводного аппарата.

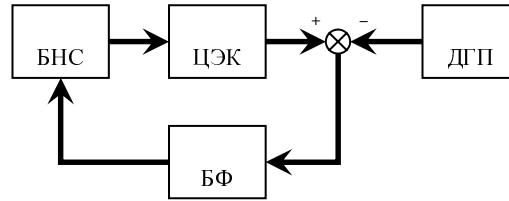


Рис. 1. Структурная схема системы навигации по геофизическим полям

Как мы уже отмечали выше, можно построить не карту рельефа дна, а псевдокарту – набор значений, сопоставленный с некоторой областью дна океана. В качестве такой информации предлагается использовать толщину слоев дна и коэффициент отражения от границы вода-грунт.

При излучении звукового импульса прямоугольной формы с синусоидальным заполнением первый отраженный импульс будет нести информацию о расстоянии до дна и коэффициент отражения границы “вода-дно”, последующие импульсы – информацию о толщине слоев. Данные величины характеризуют свойства данного участка дна.

Карта коэффициентов отражения будет иметь меньшую зависимость внешнего вида карты от сферического расхождения волн в среде, если рассчитывать коэффициенты отражения, используя следующую модель [3].

Уравнение Гельмгольца (3) с граничными условиями (3а):

$$\Delta\varphi + k_m^2(\bar{\mathbf{r}})\varphi = q(\bar{\mathbf{r}}_0), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho_m\varphi_m|_{s_m} &= \rho_{m+1}\cdot\varphi_{m+1}|_{s_{m+1}}, \\ \frac{\partial\varphi_m}{\partial n}|_{s_m} &= \frac{\partial\varphi_{m+1}}{\partial n}|_{s_{m+1}}, \end{aligned} \quad (3a)$$

где  $\varphi$  – потенциал колебательной скорости;  $m$  – номер слоя;  $\rho_m$  – плотность  $m$ -го слоя;  $c_m$  – фазовая скорость  $m$ -го слоя;  $\omega$  – циклическая частота;  $q(\bar{\mathbf{r}}_0)$  – плотность распределения источников;  $n$  – нормаль к границе раздела между слоями  $S$ ;  $\bar{\mathbf{r}}$  – радиус-вектор, указывающий на точку наблюдения;  $\bar{\mathbf{r}}_0$  – радиус-вектор, указывающий на точку расположения источника;  $k_m = \frac{\omega}{c_m}$  – волновое число для  $m$ -го слоя.

Решение уравнения (3) с граничными условиями (3а) в случае излучения звука точечным источником в присутствии только двух различных сред можно записать [3] для верхней среды в виде

$$P_1(\bar{\mathbf{r}}) = P_0 \left[ \frac{e^{ik_m R}}{R} + K_{omp} \frac{e^{-ik_m R}}{R} \right], \quad (4)$$

где  $P(\bar{r})$ ,  $P_0$  – давление отраженной и излученной волны;  $R$  – расстояние между источником и точкой наблюдения;  $K_{отпр}$  – функция, зависящая только от угловых координат (имеет смысл коэффициента отражения волн от границы раздела).

Теоретическое выражение для коэффициента отражения, исходя из параметров сред, определяется как

$$K_{отпр} = \frac{\left( \begin{aligned} &\rho_1 c_1 \frac{\partial R_{np}}{\partial n} h_0^{(1)}(k_1 R_0|_{S_{гп}}) \cdot h_1^{(1)}(k_2 R_{np}|_{S_{гп}}) - \\ & - \rho_2 c_2 \frac{\partial R}{\partial n} h_1^{(1)}(k_1 R_0|_{S_{гп}}) \cdot h_0^{(1)}(k_2 R_{np}|_{S_{гп}}) \end{aligned} \right)}{\left( \begin{aligned} &\rho_1 c_1 \frac{\partial R_{np}}{\partial n} h_0^{(2)}(k_1 R_0|_{S_{гп}}) \cdot h_1^{(1)}(k_2 R_{np}|_{S_{гп}}) + \\ & + \rho_2 c_2 \frac{\partial R}{\partial n} h_1^{(2)}(k_1 R_0|_{S_{гп}}) \cdot h_0^{(1)}(k_2 R_{np}|_{S_{гп}}) \end{aligned} \right)}, \quad (5)$$

где  $S_{гп}$ ,  $n$  – граница раздела двух сред и нормаль к границе соответственно,  $R_{np}$  – расстояние между мнимым источником, прошедших во вторую среду волн и точкой приема (подробно расчет координат положения мнимого источника изложен в [3]).

Для второй среды выражение будет иметь вид

$$P_2(\bar{r}) = P_0 \cdot K_{np} \frac{e^{ik_m R_{np}}}{R_{np}}, \quad (6)$$

где  $R_{np}$  – расстояние между неким мнимым источником прошедших волн и точкой наблюдения;  $K_{np}$  – функция, зависящая только от угловых координат (имеет смысл коэффициента прохождения).

Выражения для  $K_{отпр}$ ,  $K_{np}$ ,  $R_{np}$ , вследствие их громоздкости, не приводятся здесь и приведены в [3].

В случае  $m$  слоев получим сложную структуру мнимых источников и выражения (4), (5), а также для  $K_{отпр}$ ,  $K_{np}$ ,  $R_{np}$  будут иметь более громоздкий вид, однако вполне применимый для численных расчетов [3].

Исходя из (4) и известного измеренного значения давления принятой (отраженной от грунта) волны, можно определить значение коэффициента отражения для экспериментальных исследований:

$$K_{отпр.изм} = \frac{P_{прин}}{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \rho_1 \cdot \left( h_0^{(1)}(k_1 \cdot 2 \cdot H) + 2 \cdot \sum_{n=1}^{N-1} h_0^{(1)}(k_1 \cdot \sqrt{4 \cdot H^2 + (n \cdot d)^2}) \right)}, \quad (7)$$

где  $P_{прин}$  – принимаемое давление;  $f$  – частота, на которой проводятся измерения;  $H$  – расстояние между антенной и грунтом;  $N$  – число элементов антенной решетки;  $n$  – номер элемента излучающей антенной решетки;  $d$  – расстояние между элементами антенной решетки.

На рис. 2 приведен график величины коэффициента отражения для сферических волн  $K_{отпр.расч.}$ , рассчитанный по формуле (5), и  $K_{отпр.измер.}$ , рассчитанный по

формуле (7), в зависимости от высоты расположения антенны над грунтом (плотность грунта – 1580 кг/м<sup>3</sup>, скорость звука в грунте – 1578 м/с, частота – 200 кГц).

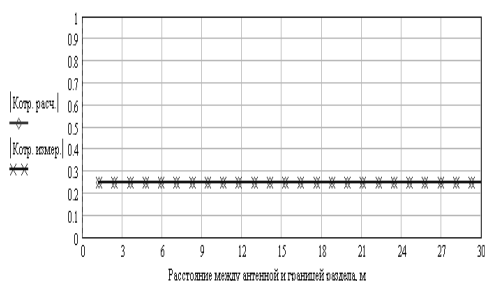


Рис. 2. Графики коэффициентов отражения  $K_{отр.расч.}$  и  $K_{отр.измер}$

тов отражения для сферических волн от дна.

Кроме того, регистрируя отражения от N слоев некоторой области дна, этой области можно сопоставить значение коэффициента отражения и N-1 временных промежутков  $t_m$ , присущих только ей. Измеряя эти параметры для каждой области дна некоторого района, можно составить навигационную псевдокарту. При начальном картографировании нужно обойти район, для которого составляется карта, измеряя эти величины и привязывая их к географическим координатам участков дна.

Для реализации данного способа была собрана экспериментальная установка и создано программное обеспечение для нее. Установка состояла из эхолота «Humminbird» (рабочая частота 200 кГц, ширина главного максимума характеристики направленности 24°, длительность импульса 0.1 мс, частота повторения импульсов 0.25 с), 8-разрядного аналого-цифрового преобразователя с усилителем и компьютера. Выход приемного тракта эхолота через усилитель подключен к аналого-цифровому преобразователю.

После излучения эхолотом акустического импульса программа считывает последовательность из 638 значений отраженного от донной структуры сигнала с аналого-цифрового преобразователя с заданным временным шагом, записывает ее в файл и отображает на экране в виде горизонтальной линии слева направо, цвет точки в линии соответствует значению напряжения на выходе приемного тракта эхолота. Так как отражение акустического сигнала происходит на границе сред с разными акустическими параметрами, то изменение цвета на экране будет соответствовать границе раздела слоев.

С помощью описанной выше установки были проведены измерения с борта неподвижного корабля в заливе Золотой Рог (рис. 3).

Измеренные значения представлены в виде графиков, показана часть, соответствующая отраженному от дна сигналу. По вертикали – время наблюдения в данной точке, по горизонтали – время после прихода импульса, отраженного от границы раздела “вода-грунт”, что позволяет наблюдать импульсы, отраженные от границ раздела слоев. Цвет точек соответствует напряжению на выходе приемного тракта эхолота.

Также были проведены измерения с борта катера, двигавшегося в бухте Патрокл. На рис. 4 показана картина, измеренная по ходу движения катера, протяженностью 380 м.

На основе расчетов и сравнения графиков, можно сделать вывод, что коэффициент отражения для сферических волн, рассчитанный по формуле (7) исходя из измеренного значения акустического давления волны, отраженной от дна, не зависит от высоты над дном и характеризует только акустические свойства того участка дна, где он был измерен. Таким образом, данный коэффициент можно использовать для составления навигационной карты коэффициентов

На рис. 5 приведен график изменения величины коэффициента отражения по давлению для сферических волн, по ходу движения катера в бухте Патрокл, рассчитанный по формуле (7), на основе измерений глубины и напряжения на выходе приемника эхолота во время движения.

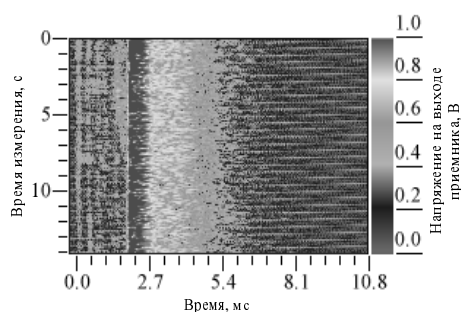


Рис. 3. Структура слоев дна при измерении с борта неподвижного корабля

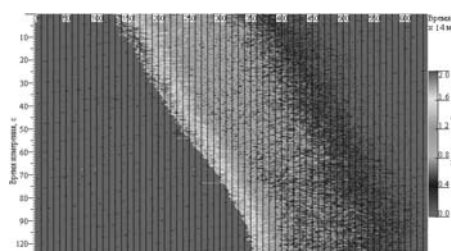


Рис. 4. Структура слоев дна вдоль движения катера

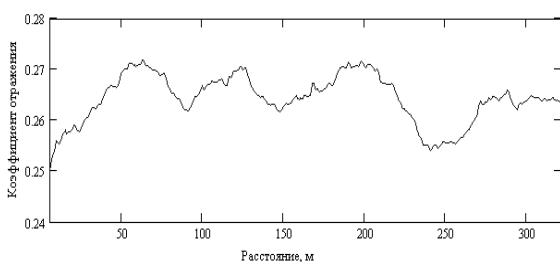


Рис. 5. График изменения значения коэффициента отражения от расстояния вдоль движения катера

будет использоваться для навигации подводных аппаратов.

Результаты работы можно использовать для навигации не только подводных аппаратов и систем, но и надводных судов, маневрирующих на мелководье в условиях стесненного судоходства.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Короченцев В.И., Розенбаум А.Н. Анализ и синтез систем связи управления движением подводных объектов по аномалиям физических полей. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – 188 с.
2. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / Под редакцией М.Д. Агеева. – М.: Наука, 2005. – 320 с.
3. Короченцев В.И. Волновые задачи теории направленных и фокусирующих антенн. – Владивосток: Дальнаука ДВО РАН, 1998. – 192 с.

**Короченцев Владимир Иванович**

Институт радиоэлектроники, информатики и электротехники Дальневосточного государственного технического университета

E-mail: [vkorocho@mail.ru](mailto:vkorocho@mail.ru)



690950, Россия, г. Владивосток, Аксаковский переулок, 3а, кафедра гидроакустики, тел.: (4232) 450982

**Титов Евгений Максимович**

E-mail: [llns@mail.ru](mailto:llns@mail.ru)

**Korochentsev Vladimir Ivanovich**

Institute of Radio electronics, Information Science and Electrical Engineering Department of Hydroacoustics

E-mail: [vkoroch@mail.ru](mailto:vkoroch@mail.ru)

3а, Axakovsky pereulok, Vladivostok, 690950, Russia, far Eastern National Technical University, Ph.: +7 (4232) 450982

**Titov Eugeny Maximovich**

E-mail: [llns@mail.ru](mailto:llns@mail.ru)

УДК 534.222

**М. А. Раскита**

### **ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ СКОРОСТИ ЗВУКА ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ВОДНЫХ МАСС**

*Целью работы является выявление погрешности метода «параллельных» звуковых лучей для неконтактного восстановления профилей скорости звука. Приводятся результаты теоретического моделирования. Отмечается, что основную погрешность вносят точность измерения расстояния между акустическими приемниками и погрешность определения времени прихода акустических сигналов.*

*Экологический мониторинг водных масс; неконтактное восстановление профилей скорости звука; метод «параллельных» звуковых лучей.*

**М. А. Raskita**

### **SOUND VELOCITY PROFILES RECONSTRUCTION ERROR ESTIMATE AT WATER MASSES REMOTE ECOLOGICAL MONITORING**

*The aim of this work is to uncover the error of “parallel” sound beams method for remote sound velocity profiles reconstruction. The results of theoretical modeling are shown. It is remarked that the main error is carried in by tolerance of distance measuring between acoustic receivers and the acoustic signals time incoming definition error.*

*Water masses ecological monitoring; sound velocity remote profiles reconstruction; “parallel” sound beams method.*

Дистанционное исследование гидрофизических параметров морской среды является одной из задач экологического мониторинга водной экосистемы. Важнейшей интегральной акустической характеристикой водных масс, позволяющей оценивать их состояние, является скорость распространения звуковых колебаний. Зависимость скорости звука от параметров морской среды принято представлять в виде вертикального профиля скорости звука (ПСЗ). В связи с этим дистанционное измерение профиля скорости звука в водной среде является актуальной задачей экологического мониторинга.