## УДК 623.98:534.222

# АНАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СИСТЕМЫ РАСЧЕТА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

#### А.М. Василенко, В.А. Пятакович

Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова» Министерства обороны Российской Федерации<sup>1</sup>

Приводятся результаты очередного этапа научных исследований авторов по вопросу создания системы мониторинга морских акваторий на основе разработок нелинейной просветной гидроакустики и нейросетевых технологий распознавания образов объектов. Проведена оценка достоверности результатов программы расчета характеристик морской среды как основного элемента структуры информационно-аналитической системы. Получены результаты расчетов характеристик морской среды при прохождении циклонического вихря. На примере района юго-восточной части п-ова Камчатка проиллюстрирован алгоритм выбора потенциально места установки глубоководной приемной системы. Смоделированы условия распространения звука на дистанциях 500 км, показано влияние сложного рельефа дна и различных глубин расположения источника звука на условия приема гидроакустических сигналов.

# введение

Расширение сферы информационных технологий в гидроакустике, связанное с ростом объема измеренных данных о состоянии морской среды, определяет развитие расчетных методик и программ как элементов информационноаналитической системы. Предлагаемая методика и реализующая ее программа расчета параметров гидроакустического поля в двумерно-неоднородном канале распространения звука основаны на лучевом приближении решения волнового уравнения с учетом условий отражения от поверхности моря и ледового покрова, переменных по трассе параметров рельефа дна, акустических свойств грунта. Прогнозирование и учет гидрологоакустической обстановки заданного района способствуют правильному выбору типов гидроакустических средств, характера использования их режимов. Состав и эффективная работа создаваемой Дальневосточной системы мониторинга полей морских акваторий требуют обоснованного выбора мест установки ее элементов и последующего накопления данных об условиях распространения акустических сигналов по контролируемым трассам [1–4]. Эти причины обусловили необходимость разработки информационно-аналитической системы (ИАС), обеспечивающей расчет структуры и параметров гидроакустического поля на трассах морских акваторий.

## 1. Расчет пространственной структуры и параметров гидроакустического поля на трассах с переменными характеристиками среды и ее границ

Структура ИАС определяется ее функциональным назначением. Методом вычислительного эксперимента ИАС должна обеспечивать оценку параметров гидроакустического поля (ПГАП) заданного района, работая как с данными натурных измерений, так и с автоматизированной выборкой данных из баз, основанных на обобщении многолетней гидрологической информации [5]. В качестве анализируемых параметров могут быть рассмотрены аномалия распространения, потери на распространение, оптимальный угол наклона характеристики направленности антенны.

Структура ИАС включает:

 базы данных многолетних наблюдений за наиболее значимыми параметрами канала распространения звука (поле скорости звука, рельеф дна, статистические данные о грунте, льде и поверхностном волнении);

 базы данных с характеристиками используемых технических средств и параметрами целей;

• методики для реализации моделей данных о характеристиках канала распространения акустических волн и закономерностей формирования звукового поля;

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> 690062, Владивосток, Камский переулок, 6. Тел.: 8 (423) 2360946. E-mail: kahunya@ gmail.com, pva.877com@mail.ru

 динамические библиотеки, обеспечивающие автоматизированную подготовку исходных данных из баз данных;

• программно-математическое обеспечение для расчета ПГАП и статистического анализа результатов расчетов.

Аналитические свойства системы связаны с формированием статистических описаний анализируемых параметров в виде их стандартизованных функций, позволяющих наиболее полно оценить поведение параметра в заданной пространственно-временной области, дать вероятностную оценку не только дальности действия гидроакустических средств, но и площади зоны освещения подводной обстановки. Основным элементом структуры ИАС является методика расчета и анализа количественных оценок гидролого-акустической обстановки. Постоянное увеличение объема измеренных данных о состоянии морской среды определяет возрастающие требования к прогнозу гидролого-акустической обстановки. Например, обеспечение оценки ПГАП для фронтальных, вихревых зон и районов со сложным рельефом дна. Для решения задачи были разработаны методика и программа расчета ПГАП «Дальность» [6].

Одной из отличительных особенностей от ранее разработанных методик является то, что горизонтальные неоднородности поля скорости звука представляются по дистанции набором элементарных одномерно-слоистых задач, что обеспечивает более устойчивую и быструю по времени работу программного продукта в сложных гидрологических условиях.

Пример лучевой картины, рассчитанной по программе «Дальность» для мелководного участка, приведен на рис. 1. На время работы программного модуля расчета параметров гидроакустического поля оказывает влияние не только быстродействие компьютера, но и вычислительный процесс, обусловленный алгоритмом решения задачи. Задача моделирования распространения звука в океане из-за ветвления вычислительного процесса алгоритмически сложная. Построение лучевых картин состоит из большого числа условных операторов (проверок на прохождения траектории луча через слои, на отражение от поверхности или дна моря, на условие полного внутреннего отражения, на применимость лучевой теории и т.д.), в результате которых выполняется необходимое действие программы.

Так же на время работы программы влияет и количество исходных данных. Если стремиться к более полному описанию структуры поля скорости звука и принимать в качестве исходных данных профили вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) с несколькими тысячами горизонтов, то время выполнения программы увеличится за счет значительного увеличения числа проверок и вычислительных операций на границе каждого слоя.

Например, вариант расчета ПГАП для профиля BPC3 с 3077 горизонтами считался 562 с, в 187 раз дольше, чем вариант для профиля ВРСЗ с 34 горизонтами (стандартные горизонты и характерные точки профиля), который выполнялся 3 с, а разность потерь при распространении звука не превышала 4 дБ для 75% значений. Следовательно, расчеты структуры гидроакустического поля целесообразнее проводить для обоснованного количества профилей ВРСЗ по трассе и числа горизонтов в них, обеспечивающих заданную точность при решении задачи.

Основным критерием применимости методики расчета ПГАП является адекватность модели данных натурным измерениям. Критерием может служить точность измерения уровня звукового давления в морских условиях, которая может изменяться в пределах от 2 до 4 дБ [7]. Для сравнения будем использовать меру различия значений потерь при распространении звука, полученных в ходе эксперимента, и потерь при распространении звука, рассчитанных по программе «Дальность» для данных натурного эксперимента.



Puc. 1. Расчет траекторий лучей, проходящих мелководный участок

На рис. 2 представлены гистограмма и кумулята, построенные для трехсот значений, вычисленных как разность между натурно измеренными и расчетными потерями при распространении звука, иллюстрирующие, что 68% данных входит в интервал от 0 до 4 дБ. Это позволяет сделать вывод, что результаты программы «Дальность» хорошо согласуются с натурными измерениями потерь на распространение звука.

Оценка адекватности методики расчета ПГАП может быть получена при ее сравнении с апробированными программами. Такой подход оправдан, если речь идет о прогнозе потерь при распространении звука в районе со сложными гидрологическими условиями, где большое время проведения натурных измерений на протяженной трассе отдаляет полученные результаты от истинных значений. Сравнение значений потерь при распространении звука, рассчитанных по программе «Дальность», с результатами известных программам «Горизонт» и «FIELD» показало их хорошее согласование. Для примера на рис. 3. представлены гистограмма и кумулята, постро-



Рис. 2. Оценка меры различия расчетных и натурных данных о потерях при распространении звука. Частота 108 Гц, глубина источника 50 м, глубина приемника 520 м



*Рис.* 3. Разностные значения потерь при распространении звука, рассчитанные по программам «Дальность» и «FIELD»

енные для двухсот разностных значений потерь при распространении звука, рассчитанных по программам «Дальность» и «FIELD», иллюстрирующие, что 94% данных входят в интервал от 0 до 4 дБ.

Таким образом, оценки достоверности результатов программы «Дальность» позволяют сделать вывод о том, что лучевая теория, положенная в основу численного моделирования условий распространения акустических сигналов, дает результаты, удовлетворяющие практическим запросам. Практической значимостью исследований являются расчеты параметров гидроакустического поля, проведенные по натурным измерениям скорости звука вихревого возмущения, наблюдавшегося в западной части Японского моря [8]. Его образование обусловлено взаимодействием водных масс холодного Приморского и теплого Северо-Корейского течений. Через вихревую область выполнялись гидрологические разрезы, а данные о температуре и солености фиксировались на горизонтах через 10 м от поверхности до дна. Фрагмент лучевой картины при переходе траекторий лучей через вихревую зону представлен на рис. 4. При построении лучевой картины по натурным данным контролировалось изменение горизонтальных и вертикальных градиентов скорости звука. Из дальнейшего расчета параметров гидро-



Рис. 4. Фрагмент лучевой картины при переходе траекторий лучей через вихревую зону (ось подводного звукового канала отмечена точками)

акустического поля было исключено до 7% лучей, не удовлетворяющих условию малого изменения градиентов скорости звука на длине волны.

На рис. 5 представлены результаты расчета потерь при распространении звуковой энергии при вторжении вихря. Изолинии равных потерь на распространение иллюстрируют влияние вихревой линзы.

Из рис. 5 видно, что прием сигнала на глубине 100 м существенно затруднен, поскольку после прохождения ядра вихря звуковая энергия более резко переходит в глубокие слои от 400 до 600 м, чем в зоне фронта.

Разность матриц потерь на распространение (с вихрем и без него) дает увеличение потерь на распространение звука на 6–12 дБ в области вихревой линзы относительно точек с теми же координатами во фронтальной зоне, как показано на рис. 6.

Отметим, что ограничения лучевой теории могут сказаться в приповерхностном слое глубиной до 50 м со стороны холодного Приморского течения, где значения вертикального градиента скорости звука не превышают 0,06 с<sup>-1</sup>. Максимальное значение горизонтального градиента составляет 0,00002 с<sup>-1</sup> и наблюдается на северной периферии вихря со стороны холодного течения. Рассмотрим результаты вычисления значений фактора фокусировки звуковой энергии, определяемого как отношение интенсивности звука в сечении лучевой трубки на некотором расстоянии в рефрагирующей среде к интенсивности того же источника на том же расстоянии в бесконечной однородной среде. Статистический анализ данных показывает, что из выборки в 3021 значение величины фактора фокусировки не превышают 32 единиц с обеспеченностью 75%, медианное значение фактора фокусировки равно 11,89 единиц. Увеличение значений фактора фокусировки до 100-225 единиц объясняется пересечением лучей, попавших в подводный звуковой канал с группой энергонесущих водных лучей, претерпевших полное внутреннее отражение вблизи дна. Наибольшие значения фактора фокусировки в 250-450 единиц наблюдаются в зоне максимальных



источника 50 м

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ПОДВОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ПОДВОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



*Рис.* 6. Разностная картина изменения потерь на распространение звука при вторжении вихря

горизонтальных градиентов скорости звука.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что методика применима для оценки эффективности гидроакустических средств, в том числе и в сложных гидрологических условиях. Результаты свидетельствуют о практической значимости методики и программы «Дальность» как основного элемента структуры информационно-аналитической системы и обеспечивают возможность ее внедрения в создаваемые системы мониторинга полей морских акваторий для решения задач исследования и освоения океанской среды в интересах морской науки и народнохозяйственного комплекса.

Информационно-аналитическая система, обеспечивающая расчет структуры и параметров гидроакустического поля на трассах морских акваторий, может быть применена:

• в научно-исследовательских и научно-производственных организациях при конструировании и проведении испытаний новых образцов гидроакустических средств, адаптируемых к конкретному району;

 в учебном процессе при подготовке курсантов военно-морских институтов или специалистов в области гидроакустики;  в качестве инструмента исследователя, позволяющего совершенствовать методы прогноза параметров гидроакустического поля, изучать особенности гидрологоакустической обстановки районов Мирового океана;

 для оценки оптимальной конфигурации пространственноразвитой гидроакустической системы и определения горизонтов расположения излучающих и приемных блоков гидроакустических систем мониторинга полей на протяженных морских трассах с переменными характеристиками среды и ее границ.

Направлением функционального развития информационно-аналитической системы является разработка модуля, реализующего кригинг-интерполяцию, обладающую наилучшими корреляционными связями между измеренными и модельными значениями анализируемых параметров, что дает возможность дальнейшего их сопряжения с картами районов.

## 2. Выбор места установки глубоководной приемной системы

Проиллюстрируем решение задачи выбора места установки глубоководной приемной системы с прогнозом условий распространения звука в целях оценки

необходимого энергетического потенциала при конструировании нового гидроакустического средства, адаптируемого к конкретному региону. Исходной точкой в работе будет являться анализ рельефа дна в районе юго-восточной части п-ова Камчатка, чтобы обозначить возможные места установки глубоководной приемной системы. Для построения фрагмента поверхности рельефа дна из базы данных лля северо-западной части Тихого океана были выбраны значения глубин места в секторе с вершиной в точке, расположенной вблизи береговой линии Авачинского залива. Наиболее примечательными элементами рельефа дна являются глубоководный Курило-Камчатский желоб и возвышенность Обручева.

Анализ глубин места в заданном секторе показал, что шельфовая зона имеет ширину до 12 км, в интервале глубин 50-200 м уклон дна возрастает до 1,7°. В пределах участка материкового склона 200-3000 м выделяются возвышенности и впадины с резко меняющейся глубиной. На горизонтах более 3000 м материковый склон крутыми уступами переходит в Курило-Камчатский желоб с глубинами, превышающими 6,5 км для большинства направлений. Дно северной части Авачинского залива сложено неконсолидированными отложениями. Структура неконсолидированных отложений на шельфе свидетельствует о том, что их формирование было обусловлено интенсивным сносом обломочного материала с побережья, обрамляющего залив, в том числе и с Шипунского полустрова [9].

Выбор места установки определяется приемлемым удалением изделия от береговой линии, соответствующей этому расстоянию глубиной места, размером и наклоном площадки, на которой предполагает-



Рис. 7. Фрагмент рельефа дна Авачинского залива и направления расчета потерь на распространение звука

ся расположить приемную систему.

На рис. 7 приведен фрагмент рельефа дна Авачинского залива с направлениями расчета потерь на распространение звука.

По графикам рельефа дна для соседних направлений выделяются участки, отвечающие заданным условиям к месту установки приемной системы. Затем в центре каждого участка вычисляется средняя глубина. Полученное значение глубины места в центральной точке сопоставляется со значением, выбранным для ее географических координат из базы данных. Сравнение вычисленного среднего и базового значений дает возможность судить о поднятии рельефа дна в центре участка.

Из группы точек для последующего моделирования условий распространения сигналов выбираются те, которые принадлежат более ровным участкам. Анализ условий распространения звука проведен с помощью программного модуля информационноаналитической системы расчета потерь на распространение звука в двумерно-неоднородном волноводе [6], основанного на лучевом приближении решения волнового уравнения и обеспеченного для заданного района данными о состоянии поверхности моря, вертикальном распределении скорости звука, рельефе дна.

Качество моделирования условий распространения звука ограничивается отсутствием необходимой информации о параметрах донного грунта в Авачинском заливе, для оценок использовались усредненные данные для северной части Тихого океана [10].

В рамках статьи представим результаты расчета потерь на распространение звука только для одного месяца – января, предельной дистанции расчета 500 км, глубин погружения источника 10 м и 150 м, глубины приемника 2720 м, частоты 150 Гц.

Профили рельефа дна для направлений расчета по азимутам 42°–202° с шагом 10° приведены на рис. 8, из них можно выделить следующие группы:

• крайние трассы в 42°, 192° и 202° с линиями рельефа дна, наиболее пологого относительно других направлений, переходящих уступами в материковый склон на дальних дистанциях;

• трассы 52°-92° с подъемом линий рельефа дна на дистанциях, близких к излучателю, и провалом с глубинами до 7600 м, переходящим на дальних дистанциях расчета в материковый склон;

 трассы 102°–152° без подъема линий рельефа дна на дистанциях, близких к излучателю, и более узкими поперечными сечениями желоба с глубинами до 7800 м, наиболее круто переходящего в материковый склон;

• трассы 162°–192° без подъема линий рельефа дна на дистанциях, близких к излучателю, с глубинами желоба до 7000 м, переходящего уступами в материковый склон.



*чис. 8.* Профили рельефа дна для направлении расчета по азимутам 42<sup>-2</sup>02<sup>-</sup>, сходящимся на расстоянии 500 км в точке установки приемной системы

Полученная для рассматриваемых условий лучевая картина, представленная на рис. 9, характерна для зимнего периода, когда горизонтальное распространение звука сопровождается многократным отражением от поверхности воды.

Известно, что за счет положительной рефракции звуковых лучей рельеф дна не должен оказывать существенного влияния на формирование звукового поля. Однако с погружением источника звука у лучей, отражающихся от поверхности моря, точки полного внутреннего отражения проникают до более глубоких горизонтов толщи воды. Ввиду того что часть трасс на ближних дистанциях имеет возвышенности, а на дальних дистанциях все трассы проходят по материковому склону, с погружением источника увеличивается количество лучей, претерпевающих на соответствующих дистанциях отражение от дна, что влечет значительное увеличение потерь на распространение звука.

Из графиков потерь на распространение звука, представленных на рис. 10, рассчитанных по заданным направлениям, видно, что погружение источника звука в январе до 150 м ухудшает условия приема сигналов за счет сложного рельефа дна в районе установки глубоководной приемной системы, что, в свою очередь, сказывается на прогнозируемых величинах дальности действия гидроакустического средства. Оценивая потери на распространения звука для группы центральных точек, оптимальным местом установки приемной системы будем считать тот участок, где гидроакустическое средство имеет наибольшие значения дальности действия для направлений по всем месяцам.

На примере района юго-восточной части п-ова Камчатка проиллюстрирован алгоритм выбора потенциально места установки глубоководной приемной системы.



*Рис.* 9. Лучевая картина, рассчитанная для января, по направлению расчета с азимутом 72°, глубиной источника 150 м



Рис. 10. Потери на распространение звука для направлений расчета по азимутам 42°– 202° с шагом 10° в январе, частота излучения 150 Гц, глубина приемника 2720 м, глубины излучения 10 м (а), 150 м (б)

Смоделированы условия распространения звука в январе, показано влияние сложного рельефа дна и различных глубин расположения цели на условия приема гидроакустических сигналов.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Накопленные информационные ресурсы о состоянии поля скорости звука и рельефе дна, а также опыт разработки программных модулей, реализующих автоматизированную подготовку данных и расчет потерь на распространение звука, позволили более эффективно и качественно решать задачу прогноза условий распространения звуковой энергии в морской среде. Автоматизация трудоемкого начального этапа – подготовки исходных данных – дала возможность производить массовые расчеты для статистических оценок таких величин, как потери при распространении звука, оптимальный угол наклона характеристики направленности антенны и др. Статистические описания анализируемых параметров в виде их стандартизованных функций позволяют наиболее полно оценить поведение параметра в заданной пространственно-временной области, дать вероятностную оценку не только дальности действия гидроакустических средств, но и площади зоны освещения подводной обстановки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Василенко А.М., Мироненко М.В., Пятакович В.А. и др. Система мониторинга полей источников атмосферы, океана и земной коры на основе технологий нелинейной просветной гидроакустики / ТОВВМУ имени С.О. Макарова. Владивосток, 2015. 320 с.

2. Пат. 2593624 РФ, МПК G10К 11/00. Радиогидроакустическая система передачи информационных волн из морской среды в атмосферу и обратно / Мироненко М.В., Василенко А.М., Пятакович В.А.; заявитель и патентообладатель ТОВВМУ им. С.О. Макарова. – № 2015115229; заявл. 22.04.2015; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 22.

3. Пат. 2593673 РФ, МПК G01H 3/00. Радиогидроакустическая система параметрического приема волн источников атмосферы, океана и земной коры в морской среде / Мироненко М.В., Василенко А.М., Пятакович В.А.; заявитель и патентообладатель ТОВВМУ им. С.О. Макарова. – № 2015115230; заявл. 22.04.2015; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 22.

4. Пат. 2593625 РФ, МПК G10К 11/00. Способ передачи информационных волн из морской среды в атмосферу и обратно / Мироненко М.В., Василенко А.М., Пятакович В.А.; ТОВВМУ им. С.О. Макарова. – № 2015115231; заявл. 22.04.2015; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 22.

5. Петухов В.И., Малиновский В.Э., Василенко А.М. и др. Развитие информационно-аналитической системы прогноза гидролого-акустической обстановки на основе современных технологий // Докл. Х научной школы-семинара академика Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XIV сессией РАО. М.: ГЕОС, 2004. С. 431–435.

6. Свидетельство № 2003611941 РФ. «Дальность». Программа расчета и анализа параметров гидроакустического поля: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / А.М. Василенко, В.Э. Малиновский, Д.А. Алюшин; Войсковая часть 90720. – № 2003611393; заявл. 26.06.2003; зарегестрировано в реестре программ для ЭВМ 22.08.2003.

7. Государственная система обеспечения единства измерений. Характеристики и градуировка гидрофонов для работы в частотном диапазоне от 0,5 до 15 МГц: Классификация [Текст]: ГОСТ 8.555-91. Введ.01.07.1992. М.: Изд-во стандартов, 1992.

8. Петухов В.И., Малиновский В.Э., Василенко А.М. и др. Модельное описание звукового поля в области циклонического вихря // Докл. Х научной школы-семинара академика Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XIV сессией РАО. М.: ГЕОС, 2004. С. 157–161.

9. Ломтев В.Л. О некоторых формах рельефа Тихоокеанской континентальной окраины Камчатки. Рельеф и структура осадочного чехла акваториальной части Дальнего Востока. Владивосток, 1981. С. 64–69.

10. Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография. М.: Мир, 1980. 584 с.

