УДК 534.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕЛКОВОДНЫХ МОРСКИХ АКВАТОРИЙ ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Д. Д. Минаев, В. И. Петухов

Дальневосточный федеральный университет¹

Рассматриваются методика и результаты моделирования акустических характеристик мелководных морских акваторий по данным натурного эксперимента, проведенного на комплексном морском полигоне, расположенном в Уссурийском заливе.

Обосновывается применение специализированных технических систем, обеспечивающих измерение гидрофизических, метеорологических и физико-географических параметров на морских акваториях в интересах формирования достоверных прогнозов возможностей гидроакустического оборудования.

Рассматриваются многомерные информационные поля на базе пространственно распределенных технических средств, объединенных в единую информационно-измерительную сеть.

введение

Современное развитие технологий геоэкологического мониторинга прибрежных морских акваторий, подверженных техногенному воздействию, предполагает использование методов дистанционного акустического зондирования, применения автономных измерительных устройств с гидроакустическим каналом связи, необитаемых подводных аппаратов, использующих акустические системы подводной навигации [1-3].Особенности применения таких технических средств и оценка их практических возможностей в значительной степени зависят от гидролого-акустических параметров среды применения, таких как изменчивость вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) и рельеф дна вдоль трассы распространения акустических сигналов, структура донных осадков и состояние поверхности моря. Существующие расчетные модели распространения звука [4-6] позволяют адекватно оценить усредненную энергетическую структуру акустического поля, однако этих сведений может оказаться недостаточно для решения практических задач определения характеристик мезомасштабных неоднородностей методами дистанционного зондирования и определения передаточных функций канала гидроакустической связи. Экспериментальные исследования в условиях конкретного морского полигона позволяют сформировать трехмерное представление частотно-пространственных спектров анализируемого сигнала. По энергетическому спектру флуктуаций амплитуды акустического сигнала можно оценить пространственную протяженность и степень влияния воздействующих гидрологических явлений, таких как ветровое волнение, приливные течения, внутренние волны

и сейшевые колебания [7, 8]. Каждое из указанных явлений обладает различным пространственным масштабом создаваемых ими неоднородностей и может быть идентифицировано по характерным проявлениям [7, 9].

В настоящей работе сделана попытка оценить гидроакустические характеристики одного из мелководных районов, непосредственно прилегающих к порту Владивосток, установить взаимосвязь флуктуаций параметров акустического сигнала с гидрологическими явлениями в интересах построения модели гидроакустического канала применительно к зарешаемым дачам, системой экологического мониторинга морских акваторий с применением автономных технических средств.

¹ 690091, Владивосток, ул. Пушкинская, 10; e-mail: petukhovv@mail.ru, minaev_dd@inbox.ru

Программа и методика эксперимента

Программа исследований включала проведение натурных и вычислительных экспериментов.

Сведения о гидрологическом режиме и параметрах канала распространения звука в районе проведения исследований получены в результате прямых измерений. Сведения включили:

 данные о приливных явлениях;

 данные о суточных флуктуациях профиля ВРСЗ в точке установки автономного измерительного комплекса (ежечасно на протяжении 26 ч до начала акустического эксперимента);

 текущие измерения профиля ВРСЗ в точках излучения (во время проведения акустического эксперимента);

 построение цифровой модели рельефа морского дна.

Оценка параметров приливных явлений осуществлялась непрерывно самописцем приливов ГР-38, установленным в исследуемом районе. Измерения продолжались на протяжении 20 суток до начала морских экспериментов, в период их проведения и далее еще 20 суток. Результаты усреднялись за каждый час наблюдения в течение суток. Совокупность реализаций за весь период наблюдения использована для



Рис. 1. Графическое представление цифровой модели рельефа дна морского полигона

вычисления средних значений уровня прилива на каждый астрономический час.

Измерения профиля скорости звука от поверхности до дна производились измерительным зондом Valeport miniSVP (диапазон измерения скорости звука 1375-1900 м/с; точность измерения скорости звука ±0,02 м/с), с регистрацией на ПЭВМ. Процесс измерения представлял собой получение в течение 3-5 минут 6 последовательных реализаций профиля ВРСЗ с последующим усреднением измеренных значений. Значения скорости звука по вертикали интерполировались с шагом 0,5 м.

Однолучевым эхолотом JRC FF-50, сопряженным с электронной картографической навигационно-информационной системой ДКарт и GPS Trimble R7 GNSS, была выполнена батиметрическая съемка морской акватории полигона. Система промерных галсов обеспечивала равномерное покрытие акватории с межгалсовым расстоянием ≈ 10 м. На основе полученной батиметрической информации была создана цифровая модель рельефа дна морского полигона с дискретностью по глубине 0.05 м.

Место для установки автономного морского измерительного комплекса было выбрано за пределами «свала глубин», в относительно ровной части полигона с глубинами 10–12 м (рис. 1, точка № 1).

Вычислительные эксперименты были выполнены для ненаправленного приема-излучения, диапазона выхода лучей $\pm 5^{\circ}$, частоты акустического сигнала 30 кГц. Степень волнения морской поверхности – 1 балл (соответствовала условиям проведения натурного эксперимента).

По результатам измерений ВРСЗ и с учетом глубины места в точке установки измерительного комплекса была сформиплоско-параллельная рована модель волновода для вычислительных экспериментов по программе [5]. Были произведены оценки влияния на уровень потерь на распространение звука (ПР) внутрисуточной изменчивости поля скорости звука (расчеты выполнены для каждого астрономического часа) и толщины волновода, обусловленных фазами прилива (с шагом 0,01 м). Оценки давались для источника и приемника, расположенных на глубине 5 м. По результатам измерений глубины места и ВРСЗ в точках излучения была сформирована модель волновода с переменными параметрами для расчетов ПР по программе [5]. С целью выявления инвариантных параметров гидроакустического канала была произведена сравнительная оценка потерь на распространение, рассчитанная для плоско-параллельной и переменной моделей волновода при глубинах излучения-приема 3-3, 5-5, 7-7 метров.

Гидроакустический эксперимент выполнялся с использованием стационарно vcтановленного автономного измерительного комплекса и перемещаемого дискретно по дистанции (шаг 50 м) и глубине (3, 5, 7 м) излучателя с частотой 30 кГц. Были выполнены измерения флуктуаций амплитуды акустического сигнала по трассе протяженностью 1000 м.

Автономный морской измерительный комплекс представлял собой плавсредство, установленное стационарно (в растяжку на якорь и бочку), на котором в ходе проведения натурных экспериментов размещались персонал и оборудование. В состав оборудования комплекса входили: средства измерения ВРСЗ, измерительный гидрофон с цифровой системой регистрации сигналов на базе ПЭВМ, система автономного электропитания. Схема постановки измерительного комплекса показана на рис. 2.

При проведении гидроакустического эксперимента с маломерного плавсредства осуществлялась последовательная постановка измерительного излучателя на глубины 3, 5, 7 м в каждой из точек трассы через 50 м (для уменьшения вклада поверхностного волнения применялся гайдропный якорь с растягивающей плавучестью). Расстояние от точки постановки излучателя до автономного морского измерительного комплекса определялось навигационной системой. Схема проведения гидроакустических измерений представлена на рис. 3.

Bo акустического время эксперимента с излучающего плавсредства эхолотом контролировалась глубина места, осуществлялись наблюдения зондом за профилем ВРСЗ. На борту комплекса велись прием и цифровая регистрация тонального сигнала частотой 30 кГц, излучаемого измерительным излучателем. В каждой точке трассы на каждой из заданных глубин продолжительность излучения сигнала составляла около 5 минут.

Акустические сигналы, зарегистрированные измерительным гидрофоном, подвергались процедуре выделения огибающей посредством преобразования Гильберта, после чего осуществлялось вычисление комплексных множителей преобразования Фурье (длина 512 отсчетов) и энергетического спектра флуктуаций ампли-



Puc. 2. Схема постановки автономного морского измерительного комплекса



Рис. 3. Схема проведения гидроакустических измерений

туды акустического сигнала. Общая длина реализации при вычислении энергетического спектра составила 10,24 секунды, при этом частотное разрешение составило 0,2 Гц. Ввиду малой продолжительности исходной реализации вычисление комплексных множителей преобразования Фурье проводилось по 512 отсчетам, с последовательным слвигом на один отсчет от начала до конца обрабатываемой реализации. Для каждого из набора комплексных множителей рассчитывался энергетический спектр, а его модуль (амплитудное значение) определялся как средневзвешенное по ансамблю спектров. Совокупность результатов обработки представлялась для

анализа в виде трехмерного представления частотнопространственных спектров анализируемого сигнала.

Результаты и обсуждение

Анализ временной изменчивости приливных явлений показал, что в исследуемом районе они носят неправильный полусуточный характер. Характерный суточный ход приливных явлений представлен на рис. 4. Суточные колебания уровня не превышают 20–25 см. Минимумы («малая вода») не равны по амплитуде и растянуты по времени. «Глобальный» минимум наблюдаются в период 14–15 часов, второй «локальный» ми-

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ПОДВОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



Рис. 4. Усредненный суточный ход уровня прилива за время проведения эксперимента (значение «-4» соответствует 20:00 по местному времени)

нимум – в 00–02 часа. Максимумы («полная вода») практически равны по величине, однако по характеру гидродинамических процессов их также можно назвать «локальным» (наблюдается в 05:00–06:00 часов) и «глобальным» (наблюдаются в 20:00 часов).

В суточном ходе вертикальной структуры поля скорости звука на полигоне явно прослеживаются два процесса (рис. 4 и 5): во-первых, дневная инсоляция и охлаждение поверхности моря в темное время суток; во-вторых, гидродинамические явления, обусловленные фазами прилива. Обобщенные результаты суточной изменчивости профиля ВРСЗ представлены на рис. 5.

В течение дня поверхностный водный слой прогревается до глубин 5–6 метров (максимум прогрева наступает в период 16:00–18:00 часов). Пик проникновения теплых водных масс (обладающих большей скоростью распространения



Рис. 6. Результаты моделирования потерь на распространение с учетом внутрисуточной изменчивости вертикального распределения скорости звука для плоско-параллельной модели волновода (источник-приемник 5 м; диапазон углов выхода лучей ±5°; частота 30 кГц)



Рис. 5. Результаты исследования суточной изменчивости ВРСЗ (значение «-4» соответствует 20:00 по местному времени)

звука) в глубину приходится на 20:00, что по данным регистрации приливных явлений соответствует «полной воде». Затем под воздействием отлива теплый слой водных масс устремляется в море, а на смену ему поднимается холодный, обладающий наименьшей скоростью звука придонный слой. Рост адвекции тепла начинается в 21:00-22:00, в период первого максимума скоростей отливного течения, и охватывает всю глубину полигона. Максимум притока холодных вод в придонном слое приходится на 02:00 (период «локальной малой воды»). Активный процесс подъема холодных вод продолжается до 08:00-10:00 часов, несколько приостанавливаясь в 04:00-05:00 на приливной фазе, предшествующей «локальной полной воде». С 06:00-08:00 часов начинается прогрев поверхности моря. В период с 06:00 до

10:00 процессы в поверхностном и придонном слоях носят разнонаправленный характер. После 10:00 «поверхностные» процессы становятся доминирующими во всей толще вод полигона.

Описание динамики гидрофизических характеристик полигона хорошо согласуется с двухслойной моделью водообменных процессов, подтвержденных результатами экспериментальных и теоретических исследований мелководных морских акваторий [7].

Сравнительная оценка внутрисуточной изменчивости ПР проводилась с использованием профиля ВРСЗ, измеренного ежечасно на протяжении суток. Результаты моделирования представлены на рис. 6 и 7.

На рис. 7, *а* представлены среднесуточные значения потерь на распространение, а на рис. 7, δ – их среднеквадратическое отклонение (СКО).



Рис. 7. Среднесуточные значения потерь на распространение (а) и СКО потерь на распространение (б)

Сплошными линиями на рис. 6, 7, *а* нанесены «сферический» (Р ~ 1/r) и «цилиндрический» (Р ~ $1/\sqrt{r}$) законы спадания звукового поля с расстоянием. Переходное расстояние от «сферического» к «цилиндрическому» закону – 30 м.

На дистанциях 0-150 м разброс значений уровня ПР в течение суток превышает 15 дБ (рис. 6), СКО достигает 12 дБ (рис. 7, б), что, по-видимому, обусловлено наличием развитой интерференционной структуры акустического поля и смещением фаз интерференции сигналов в узлах расчетной сетки. Средний спад уровня акустического сигнала соответствует «сферическому» закону, однако для практических приложений использование усреднения в этой зоне неправомерно, адекватные оценки параметров акустического сигнала могут быть получены при условии точного учета пространственного взаиморасположения источника и приемника звука в каждый конкретный промежуток времени. На дистанциях 150-300 м разброс значений уменьшается до 6 дБ, флуктуации СКО – до 3-4 дБ. Закон спадания уровня сигнала - средний между «сферическим» и «цилиндрическим». Начиная с дистанции 300 м за счет многолучевости происходит вырождение интерференционной структуры акустического поля, средний спад уровня сигнала хорошо согласуется с «цилиндрическим» законом (рис. 7, а), а флуктуации СКО уменьшаются до 2 дБ. В этом случае усредненные значения ПР можно считать инвариантными относительно изменчивости параметров волновода и адекватными для практических приложений.

Результаты моделирования потерь на распространение с

учетом изменения толщины волновода под воздействием приливных явлений представлены на рис. 8.

Как видно, наибольшей трансформации полвержены потери на распространение при толшине волновода 9.94 и 10,05 м соответственно. Изменение толщины волновода в этом случае практически кратно удвоенной длине волны акустического сигнала. которая составляет ≈ 0,05 м (частота 30 кГц). В этой связи можно предположить, что трансформация потерь на распространение обусловлена так называемым набегом фазы акустических колебаний, вызванным изменениями толщины волновода. Этот факт нуждается в экспериментальной проверке.

Сравнительная оценка потерь на распространение, рассчитанных для локальной плоско-параллельной модели волновода по данным измерений на автономном измерительном комплексе и переменной модели волновода по данным измерений на измерительном плавсредстве, была произведена для глубин излученияприема 3-5, 5-5, 7-5 м.

Результаты расчетов представлены на рис. 9. Сплошными линиями нанесены «сферический» (Р ~ 1/г) и «цилиндрический» (Р ~ 1/√r) законы спадания звукового поля расстоянием. Переходное С расстояние от «сферического» «цилиндрическому» 3860ну – 30 м, также как и в предшествующем вычислительном эксперименте (рис. 6, 7).

Сравнительный анализ графиков ПР для различных моделей волновода и глубин расположения источника и приемника звука показывает, что:

 средний спад уровня звукового поля с расстоянием под-



Рис. 8. Результаты моделирования потерь на распространение с учетом изменения толщины волновода (каждая кривая характеризует изменение потерь на распространение в диапазоне дистанций от 50 до 1000 м)



Рис. 9. Результаты моделирования потерь на распространение с учетом пространственной изменчивости параметров волновода и локальной оценки его характеристик при различных вариантах расположения источника и приемника: а – источник – 3 м, приемник – 5 м; б – источник – 5 м, приемник – 5 м; в – источник – 7 м, приемник – 5 м

чиняется «цилиндрическому» закону с переходным расстоянием ~ 50 м;

- при расположении источника и приемника на глубине 5 м (рис. 9, δ) различия в оценках потерь на распространение практически не наблюдается;

 при расположении приемника на глубине 5 м, а источника – на глубинах 3 и 7 м существенные различия наблюдаются в диапазоне дистанций 200–250 м (ПР для переменной модели волновода меньше на 10–12 дБ) и 450–500 м (различие ПР достигает 6–8 дБ). Наличие этих зон, по-видимому, объясняется концентрацией

a

донных переотражений и уменьшением толщины волновода (рис. 3).

В целом различия в результатах расчетов для различных моделей волновода существенны в ограниченных пространственных зонах, в которых усложнение расчетной модели







Рис. 11. Усредненный частотнопространственный спектр флуктуаций амплитуды акустического сигнала (а) и его мгновенная реализация на дистанции 50 м от приемника (б). Глубина излучателя – 5 м



Рис. 12. Усредненный частотнопространственный спектр флуктуаций амплитуды акустического сигнала (а) и его мгновенная реализация на дистанции 50 м от приемника (б). Глубина излучателя – 7 м

и детализация сопутствующих измерений необходимы.

Если сравнить графики ПР на рис. 9 с результатами моделирования внутрисуточной изменчивости ПР (см рис. 6, 7), также можно отметить сходство усредненного закона спада уровня звукового поля, который лежит в пределах интервала суточного разброса значений ПР. Параметры волновода и расчетные ПР соответствуют фазе «малой воды», в период которой проводились измерения по трассе.

Результаты спектральноанализа данных гидрого акустического эксперимента представлены на рис. 10-12. Показаны усредненные частотнопространственные спектры флуктуаций амплитуды акустического тонального сигнала и примеры мгновенных спектров на дистанции 50 м при глубинах расположения излучателя 3, 5, 7 м.

Анализ мгновенных спектров позволяет [7, 9] по частоте спектрально-энергетического максимума оценить дливолны ветрового волненv ния и оценить скорость ветра, его вызывающего. Так, при глубине излучателя 3 м (рис. 10, б) наблюдаются два спектрально-энергетических максимума на частотах $\approx 0,58$ и ≈ 1,17 Гц (второй спектральноэнергетический максимум кратен по частоте первому и является его второй гармоникой), что соответствует длине поверхностной волны ≈ 4,4 м и скорости ветра ≈ 2 м/с. Более высокий уровень второй гармоники в данном случае объяснить можно незначительной глубиной излучения







При заглублении сигналов. излучателя до 5 м (рис. 11, б) происходит трансформация частотно-пространственного спектра флуктуаций и частота спектрально-энергетического максимума смещается в область низких частот, составляя величину \approx 0,39 Гц (длина волны \approx 10,25 м, скорость ветра ≈ 3 м/с). С заглублением излучателя до 7 м (рис. 12, б) в спектре флуктуаций амплитуды явно проявляется звукоряд, состоящий из двух высших гармоник с базовой частотой ≈ 0.39 Гп (длина волны \approx 10,25 м, скорость ветра ≈ 3 м/с). Оценочные данные по скорости ветра на акватории полигона в период проведения эксперимента хорошо подтверждаются данными, полученными прямыми измерениями.

Качественный анализ усредненных спектров (рис. 10, а-12, а) показывает их принципиальные различия при изменении глубины расположения излучателя. При расположении излучателя в приповерхностном слое (глубина 3 м, рис. 10, а) спектральноэнергетический максимум в области нижних частот (< 2 Гц) располагается на дистанциях 100-200 м. При глубине излучателя 5 м (рис. 11, а) этот максимум смещается на дистанции 300-400 м. При перемещении излучателя в придонный слой (глубина 7 м, рис. 12, а) происходит вырождение максимума. В целом это позволяет выдвинуть предположение о различии механизмов и динамики процессов, протекающих в приповерхностном и придонном водных слоях, что согласуется с двухслойной моделью водообменных процессов мелководных морских акваторий [7, 9], рассмотренной выше. Пространственный масштаб волновых процессов, оказывающих влияние на флуктуации параметров акустического сигнала в ходе проведения эксперимента, позволяет говорить 0 возлействии проникающей с мористой стороны полигона морской зыби, волновой пакет которой претерпел фильтрацию вследствие малых глубин. Ее низкочастотные компоненты хорошо проявляются частотно-пространственных в спектрах. Можно считать, что в данном случае в приповерхностном слое доминирующим фактором, оказывающим влияние на параметры акустического сигнала, является ветровое волнение, в придонном слое, по всей видимости, — проникающая морская зыбь и приливные явления. Это хорошо согласуется с экспериментальными данными [9, 10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве факторов, определяющих достоверность прогноза возможностей гидроакустического оборудования в мелководных морских акваториях, рассмотрены приливные явления, параметры волновых процессов, батиметрические характеристики акватории, пространственно-временное распределение ВРСЗ. По результатам выполненных навычислительных турных и экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Описание динамики гидрофизических характеристик полигона хорошо согласуется с двухслойной моделью водообменных процессов мелководных морских акваторий, что проявляется во внутрисуточной изменчивости параметров поля скорости звука и частотнопространственных спектрах флуктуаций акустического сигнала.

2. В модельных экспериментах спад уровня сигнала хорошо согласуется с «цилиндрическим» законом. Усредненные значения ПР можно считать инвариантными относительно изменчивости параметров волновода и адекватными для практических приложений.

3. Результаты численного моделирования показывают наличие резонансных явлений при изменениях толщины волновода, кратных удвоенной длине волны акустического сигнала, что нуждается в дополнительной экспериментальной проверке.

4. Различия в результатах расчетов ПР для различных моделей волновода существенны в ограниченных пространственных зонах. в которых усложнение расчетной модели и детализация сопутствующих измерений необходимы. Для эффективного применения гидроакустического оборудования в таких условиях необходимо формирование пространственно распределенной информационноизмерительной сети.

В заключение можно отметить, что результаты проведенных исследований позволяют сформулировать технические требования к автономным системам геоэкологического мониторинга, использующим гидроакустический канал для передачи информации.

Неоценимую помощь авторам в формировании программы исследований и проведении моделирования оказал

В.Э. Малиновский.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвиенко Ю.В., Рылов Р.Н., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н. Экспериментальные исследования особенностей подводной дальнометрии в шельфовой зоне Японского моря // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 2(8). С. 44-49.

2. Малашенко А.Е., Перунов В.В. Глубоководные донные автономные станции в радиогидрофизических комплексах мониторинга акваторий // Подводные исследования и робототехника. 2010. № 1(9). С. 53–57.

3. Минаев Д. Д. Принципы построения региональной автоматизированной информационной системы экологического мониторинга морских акваторий с применением автономных технических средств и робототехнических комплексов // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 2(12). С. 64–68.

4. Jensen F.B., Kuperman W.A., Porter M.B., Schmidt H. Computational Ocean Acoustics, Springer Verlag. New York, 2000. 285 p.

5. Rodrguez O. General description of the BELLHOP ray tracing program. Signal Processing Laboratory (SiPLAB) at the Center of Technological Research (CINTAL). University of Algarve, Portugal, 2008. 37 p.

6. Rodrguez O. General description of the TRACE & TRACEO ray tracing programs. Signal Processing Laboratory (SiPLAB) at the Center of Technological Research (CINTAL). University of Algarve, Portugal, 2012. 69 p.

7. Андреева И.Б. Физические основы распространения звука в океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 190 с.

8. Акустика океана / под ред. Л.М.Бреховских. М.: Наука, 1974. 695 с.

9. Мальцев Ю.В., Минаев Д.Д. Экспериментальные исследования статистических характеристик параметров акустических сигналов в мелководных районах с применением волноводных антенн бегущей волны // Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ. Вып. 32. Владивосток: ТОВМИ, 2001. С. 91–100.

10. Минаев Д. Д., Негода В. В., Пахомов С. А. Результаты экспериментальных исследований суточной динамики акустических шумов в условиях мелководья // Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ. Вып. 32. Владивосток: ТОВ-МИ, 2001. С. 101–104.