

# К ВОПРОСУ О ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОЦЕНКАХ ГРУППОВЫХ СКОРОСТЕЙ МОДАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ ИМПУЛЬСНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ПРОТЯЖЕННЫХ ТРАССАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ОКЕАНА

М.А. Сорокин, П.С. Петров, Д.Д. Каплуненко, А.А. Голов, Ю.Н. Моргунов

Представлен теоретический анализ скорости распространения модальных компонент широкополосных фазоманипулированных импульсных акустических сигналов вдоль трасс протяженностью около 500 км. Для определения эффективной усредненной по трассе групповой скорости используются результаты моделирования циркуляции океана, по которым строится трехмерное поле скорости звука на рассматриваемой акватории. Результаты теоретического анализа сопоставляются с данными эксперимента. Анализируется роль горизонтальной рефракции акустических волн на неоднородностях рельефа дна и поля скорости звука в увеличении общего времени распространения от точки излучения до точки приема. Показано, что для рассматриваемых трасс влиянием этого эффекта можно пренебречь. Сопоставление импульсной характеристики волновода и теоретических оценок позволяет сделать вывод о возможности использования моделей циркуляции океана при прогнозировании времени прихода и скорости распространения модальных компонент широкополосных сигналов.

**Ключевые слова:** импульсные сигналы, групповая скорость, горизонтальная рефракция, метод нормальных волн, акустическая дальнометрия.

## Введение

При работе автономных подводных аппаратов на большом удалении от центров возникает задача их навигационного обеспечения и высокоточного позиционирования в условиях ограниченной связи. В рамках одного из подходов данная задача сводится к определению времени распространения импульсного акустического сигнала и установлению соответствующей данному режиму распространения скорости переноса акустической энергии. Первая подзадача сводится к идентификации некоторого пика в импульсной характеристике волновода, непосредственно получаемой с помощью тех или иных технических средств. После этого точность решения задач навигации и дальнометрии сводится к тому, насколько правильно удастся установить соответствующую

данному пику скорость. Эта вторая подзадача требует, во-первых, получения откуда-либо информации о трехмерном поле скорости звука на данной акватории и, во-вторых, прогнозирования на основе этой информации усредненных групповых скоростей модальных компонент навигационных сигналов.

В настоящей работе развивается методика определения этих групповых скоростей, основанная на вычислительном алгоритме, в котором используются трехмерные поля скорости звука, полученные с использованием модели циркуляции океана. Предполагается, что такие модели, будучи откалиброванными по данным прямых натурных измерений, могут обеспечить существенное повышение точности решения задач акустической дальнометрии (по сравнению с точностью расчетов, основанных на точечном измерении скорости звука на оси подводного звукового

канала), а также учет тонких физических эффектов, связанных с трехмерным характером распространения звука в сложной морской среде.

Дальнее распространение звука (то есть распространение на дистанции, превышающие 100 км) как в мелком море, так и в глубоком океане подвержено влиянию различных факторов [1], которые необходимо учитывать при последующем анализе и моделировании акустических полей и расчете групповых скоростей и времен прихода модальных компонент импульсных сигналов. Среди них можно отметить, в частности, искажение формы сигнала, обусловленное межмодовой и внутримодовой дисперсией, а также горизонтальную рефракцию звука и его рассеяние на гидрологических неоднородностях в толще воды [2–6]. Адекватность учета влияния данных эффектов при математическом моделировании распространения звука прямо зависит от качества имеющихся данных о пространственном распределении скорости звука и рельефе дна на рассматриваемой акватории.

Данные прямых измерений, получаемые при проведении экспериментальных исследований, имеют заведомо недостаточное пространственное разрешение и, как следствие, не позволяют учесть влияние гидрологических и батиметрических неоднородностей, размер которых не превосходит длину акустической трассы. Таким образом, экспериментальные данные оказываются малопригодными к детальному воспроизведению эксперимента *in silico*, что приводит к необходимости поиска данных с более высоким пространственным разрешением.

Оказывается, что модели циркуляции океана и открытые базы топографических карт океанского дна способны обеспечить специалистов по моделированию распространения звука данными о строении океанических волноводов с высоким пространственным разрешением. В работе обсуждается применение подобных данных для моделирования натурального эксперимента, выполненного в ТОИ ДВО РАН на двух трассах, имеющих протяженность 212 км и 497 км, первая из которых является глубоководной, а вторая характеризуется распространением звука с шельфа в глу-

бокий океан. В ходе математического моделирования распространения звука с применением гидрологических данных высокого разрешения, полученных из модели циркуляции океана NEMO, удалось выполнить достаточно точные теоретические оценки групповых скоростей модальных компонент акустического сигнала. Адекватность выполненных оценок подтверждается путем сопоставления рассчитанных по групповым скоростям времен прихода модальных компонент и импульсной характеристики волновода, наблюдаемой в эксперименте.

Результаты проведенных исследований имеют важное практическое значение, в частности, для дальнейшего повышения точности, обеспечиваемой системами акустической дальнометрии.

## 1. Область проведения эксперимента

Экспериментальные исследования проводились на акустических трассах с характеристиками, типичными для Охотского моря в летний период. В точках № 1 и № 2 (рис. 1) мобильный широкополосный пьезокерамический излучатель (источник навигационных сигналов) свешивался при помощи крановой установки с борта исследовательского судна. Один раз в три минуты излучался широкополосный фазоманипулированный сигнал с несущей частотой 400 Гц на основе M-последовательности длиной 1023 символа, который принимался в точке № 3.

Первая акустическая трасса (точка № 1 – точка № 3) протяженностью 497 км была ориентирована под небольшим углом к нормали, проведенной к

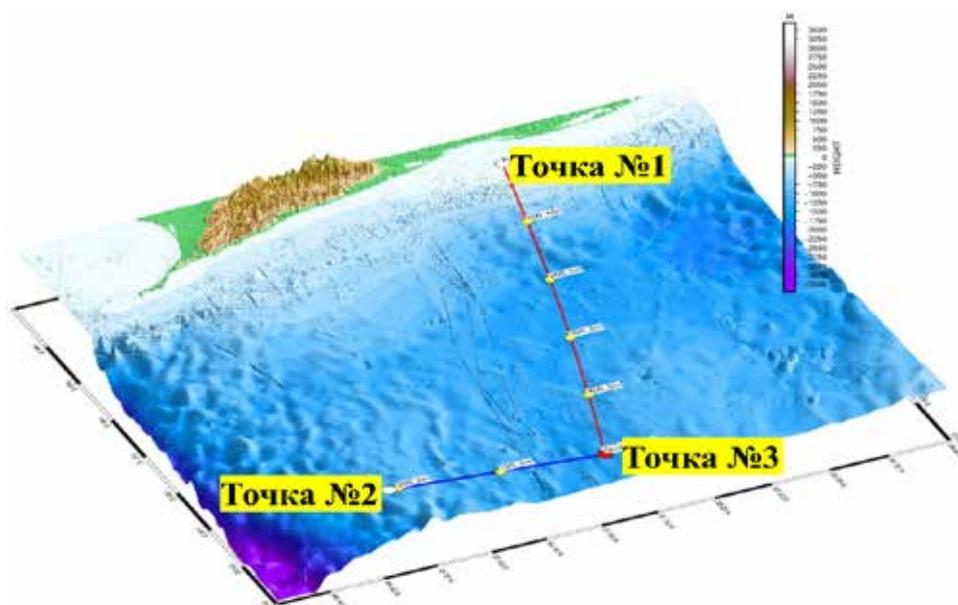


Рис. 1. Общая схема проведения эксперимента

кроме шельфа Охотского моря. Глубина моря вдоль трассы варьировалась от 200–400 м в шельфовой части до 1200–1400 м в глубоководной части. Вторая акустическая трасса (точка №2 – точка №3) длиной 212 км проходила по глубоководной части Охотского моря (глубины вдоль трассы варьируются от 800 до 1400 м) и была ориентирована трансверсально относительно первой акустической трассы.

В данном эксперименте гидрологическое зондирование было выполнено только в точках излучения и приема. Разумеется, этот факт делает практически невозможной адекватную оценку эффективной скорости распространения сигнала по данным указанных зондирований.

## 2. Теоретический аппарат

Считая, что двумерный разрез трехмерного поля скорости звука вдоль акустической трассы, а также батиметрия и свойства дна нам известны, скорости переноса акустической энергии различными модальными компонентами импульсного сигнала могут быть оценены путем усреднения вдоль трассы групповых скоростей мод, рассчитанных на центральной частоте сигнала. Используемый при этом математический аппарат описан более подробно в работах [2–6]. Усреднение здесь действительно необходимо, поскольку, как будет показано ниже, групповые скорости мод варьируются вдоль акустической трассы в достаточно широких пределах.

Если известны модовые функции  $\phi_j(r, z)$  и волновые числа  $k_j = k_j(r)$  (здесь  $z$  означает глубину, а  $r$  – расстояние по горизонтали вдоль геодезической от источника до данной точки трассы), то групповую скорость  $v_j^g(r)$  в данном поперечном сечении волновода можно рассчитать, используя формулу

$$\frac{1}{v_j^g(r)} = \frac{\omega}{k_j} \int_0^H \frac{(\phi_j(z))^2}{\rho(z)c^2(z)} dz. \quad (1)$$

Групповые скорости, как правило, варьируются вдоль протяжённой акустической трассы в достаточно широких пределах, поэтому их значения необходимо особым образом усреднить. Методика усреднения подробно описана в [2–4] и основана на предположении о плавности изменения групповых скоростей между точками, в которых из-

вестны вертикальные разрезы поля скорости звука (ВРСЗ).

В случае, если при распространении звука существенную роль играет горизонтальная рефракция и, таким образом, собственный горизонтальный луч для данной моды существенно отклоняется от геодезической, значение соответствующей групповой скорости  $v_j^g(r)$  должно усредняться вдоль такого собственного луча (в вычислительном отношении процедура мало отличается от усреднения вдоль геодезической).

## 3. Модельные гидрологические данные

Гидрологические данные о пространственном распределении скоростей звука были предоставлены моделью циркуляции океана Nucleus for European Model of Ocean (NEMO), в которой реализовано численное решение уравнений Навье–Стокса. Такой выбор обусловлен тем, что подобные модели обеспечивают воспроизведение на поле скорости звука крупномасштабных гидрологических неоднородностей (пространственное разрешение данных – 1/12 градуса по широте и долготе [7]). Разрез поля скорости звука в горизонтальной плоскости для изучаемой акватории представлен на рис. 2.

Данные о рельефе дна в подобных экспериментах также часто недоступны в силу сложности получения, поэтому была использована база данных земной топографии SRTM, к которой авторы уже обращались в работах [5, 6].

Данные акустические трассы ориентированы таким образом, что в обоих случаях разумно ожидать проявления явления горизонтальной рефракции. Для

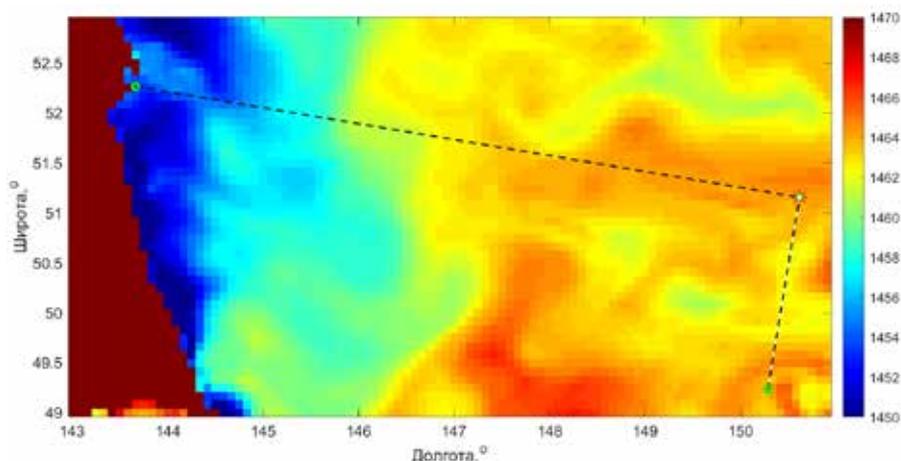


Рис. 2. Контурный график поля скорости звука на горизонтальном разрезе на глубине 25 м, полученного с использованием модели циркуляции океана NEMO. Пунктирными линиями обозначены экспериментальные акустические трассы (длинная – протяженностью 497 км, короткая – 212 км)

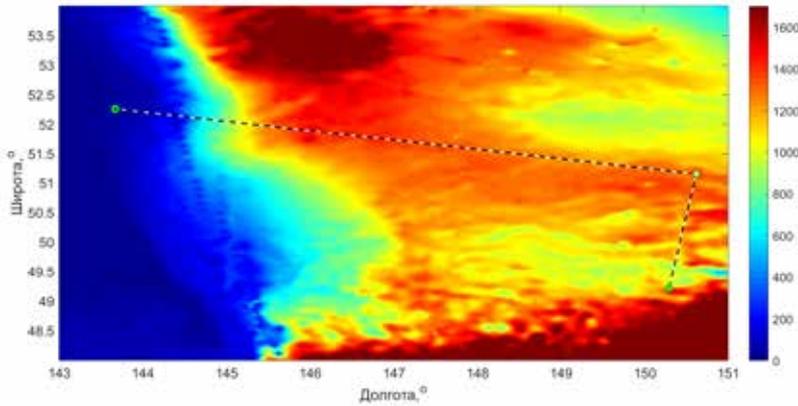


Рис. 3. Рельеф океанского дна в районе проведения эксперимента, полученный из базы данных земной топографии SRTM. Пунктирными линиями обозначены экспериментальные акустические трассы (длинная – протяженностью 497 км, короткая – 212 км)

оценки влияния этого эффекта на точность решения задач акустической дальнометрии необходимо воспользоваться теорией горизонтальных лучей и вертикальных мод (см. также [8]). В некоторых ситуациях длины собственных горизонтальных лучей могут заметно отличаться от длины геодезической.

С учетом данного эффекта методика оценки групповых скоростей мод и соответствующих времен прихода может быть описана в виде следующего алгоритма:

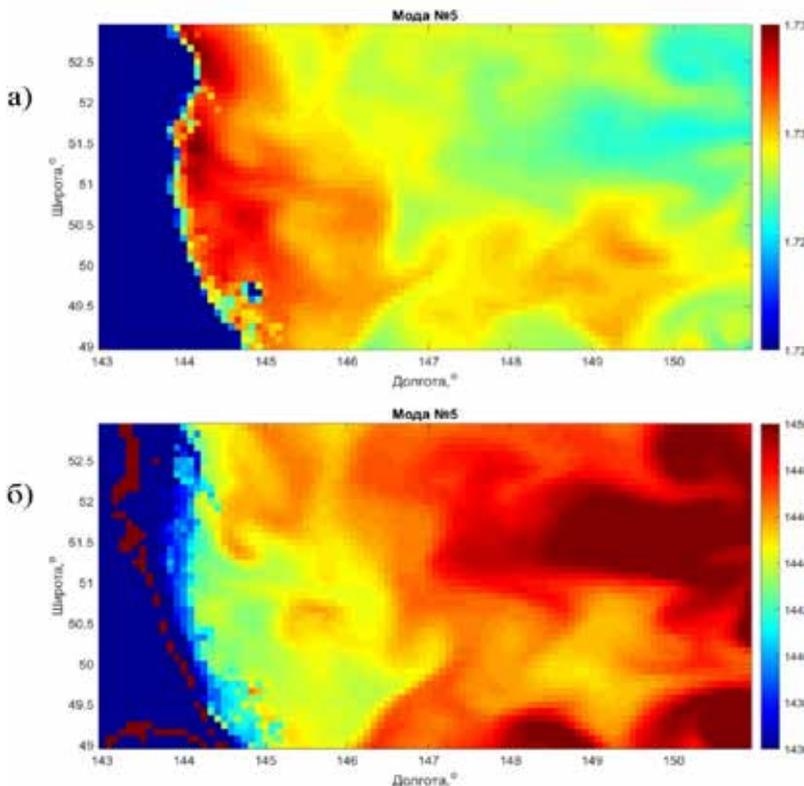


Рис. 4. Контурный график зависимости групповых скоростей  $k_j = k_j(x, y)$  (а),  $v_j^g = v_j^g(x, y)$  (б), для  $j = 5$  от широты  $y$  и долготы  $x$  (в градусах)

1) вычисление поля  $k_j$  в каждом узле расчетной сетки на заданной акватории (обычно сетка определяется разрешением поля скорости звука, полученного из модели);

2) вычисление поля  $v_g^j$  в тех же узлах расчетной сетки;

3) расчет собственных горизонтальных лучей мод (см. следующий раздел);

4) интерполяция значений  $v_g^j$ , полученных на шаге 2, на траектории собственных лучей;

5) усреднение  $v_g^j$  и расчет  $t_j$  вдоль соответствующих собственных лучей.

Результаты выполнения первых двух шагов алгоритма для рассматриваемой акватории представлены на рис. 4.

#### 4. Оценка удлинения собственных лучей под влиянием явления горизонтальной рефракции

При распространении звука в трехмерном океаническом волноводе звуковое поле каждой тональной компоненты сигнала может быть представлено в виде разложения [8]:

$$\hat{P}(f, x, y, z) = \sum_j A_j(x, y) \varphi_j(x, y, z), \quad (2)$$

где  $\varphi_j$  суть локальные модовые функции, образующие базис для представления поля в данном вертикальном разрезе волновода. При этом коэффициенты в таком представлении суть модовые амплитуды  $A_j$ , зависящие лишь от горизонтальных координат  $x, y$  (т.е.  $A_j = A_j(x, y)$ ) и удовлетворяющие (в адиабатическом приближении) уравнению горизонтальной рефракции

$$\frac{\partial^2 A_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_j}{\partial y^2} + k_j^2 A_j = 0. \quad (3)$$

Применяя стандартную технику построения полуклассических решений уравнения (3)  $A_j \approx A_j e^{i\theta(x, y)}$ , легко установить, что функция  $\theta(x, y)$  удовлетворяет уравнению Гамильтона–Якоби вида:

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial y}\right)^2 = k_j^2. \quad (4)$$

Вводя обозначения  $P = \frac{\partial \theta}{\partial x}, Q = \frac{\partial \theta}{\partial y}$ , можно записать связанную с этим уравнением систему Гамильтона:

$$x_s = \frac{P}{k_j}, \quad y_s = \frac{Q}{k_j}, \quad P_s = \frac{\partial k_j}{\partial x}, \quad Q_s = \frac{\partial k_j}{\partial y}, \quad (5)$$

из которой и определяются траектории горизонтальных лучей, соответствующих вертикальной моде с номером  $j$  (нижний индекс  $s$  означает производную по параметру луча). В формуле (5) нижний индекс  $s$  означает дифференцирование по натуральному параметру вдоль луча.

Если известны функции  $k_j = k_j(x, y)$  (которые могут быть вычислены путем решения спектральной задачи), то горизонтальные лучи могут быть найдены с помощью численного решения системы (6) методом Рунге–Кутты. При этом в качестве начального условия используется  $x(0) = 0, y(0) = 0, P(0) = k_j \cos \alpha, Q(0) = k_j \sin \alpha$ , где  $\alpha$  есть начальный угол скольжения луча относительно оси  $x$ . Поскольку нас интересует не расчет акустического поля, а установление траекторий распространения модальных компонент от источника к приемнику в горизонтальной плоскости, то необходимо решить задачу стрельбы, т.е. выбора значения  $\alpha$  таким образом, чтобы вышедший из источника луч попал в точку приема (такой луч называется собственным).

Выпустим из источника веер лучей с малым шагом по углу скольжения. Предположим, что точка приема находится между двумя лучами  $j$ -й модальной компоненты, вышедшими из источника под углами  $\alpha_1^j$  и  $\alpha_2^j$ , и проведем нормаль к геодезической. В таком случае расстояние между точками пересечения нормалью лучей будет равно  $y_1$  и  $y_2$  соответственно, и истинный угол  $j$ -й модальной компоненты, под которым собственный луч выходит из приемника, будет вычисляться по следующей формуле:

$$\alpha_j = \frac{y_2}{|y_1 - y_2|} \alpha_1^j + \frac{y_1}{|y_1 - y_2|} \alpha_2^j. \quad (6)$$

Данные вычисления были проведены для обеих акустических трасс, но для де-

монстрации результата выбрана акустическая трасса длиной 497 км (рис. 5). В данном случае влияние горизонтальной рефракции становится заметным лишь для моды больших номеров ( $j = 15$ ).

После нахождения собственных лучей отдельных мод для центральной частоты импульсного сигнала мы усредняем вдоль них групповые скорости по описанной выше методике, после чего находим гео-

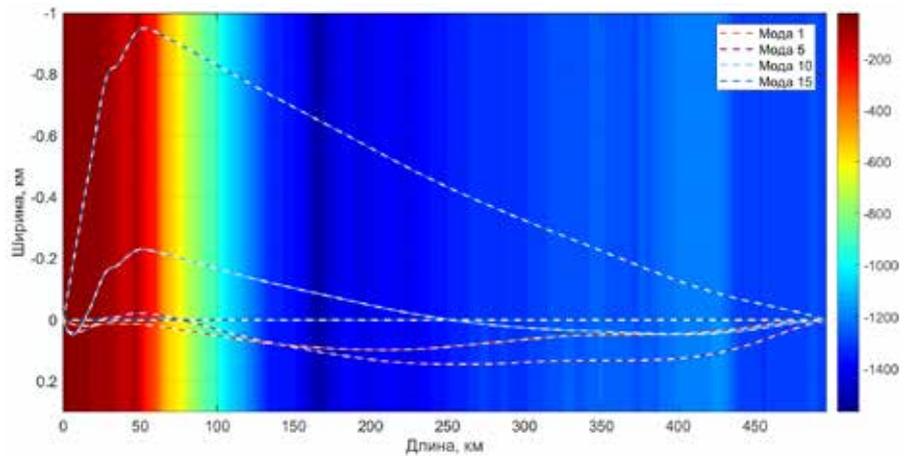


Рис. 5. Траектории собственных горизонтальных лучей для длинной акустической трассы (см. рис. 1) и номеров мод  $j = 1, 5, 10$  и  $15$  в проекции на батиметрические данные

метрические оценки времен прихода модальных компонент как частные длин лучей  $R_j$  и усредненных групповых скоростей (рис. 6).

Из рис. 6 видно, что удлинения пути, проходимого различными модальными компонентами импульсного сигнала (по сравнению с длиной геодезической), практически монотонно возрастают с номером моды, а также что их размер не превышает 30 м для первых 25 мод. Таким образом, мы можем сделать вывод, что для рассматриваемых трасс горизонталь-

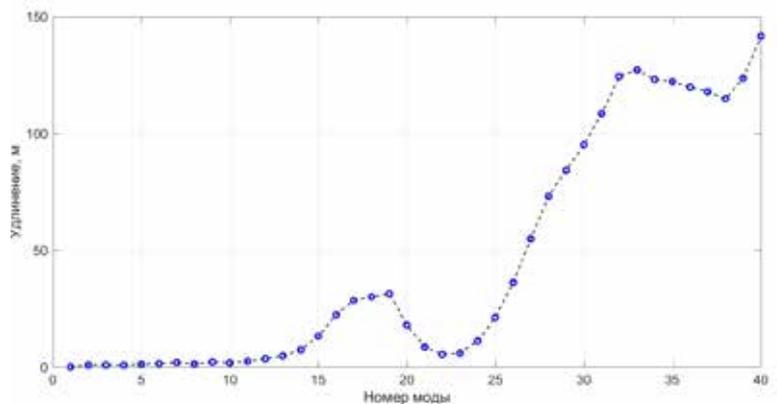


Рис. 6. График зависимости удлинения собственного луча по сравнению с длиной геодезической от номера моды в рассматриваемом эксперименте

ная рефракция лишь незначительно влияет на точность решения задач дальнометрии. Отметим, что в других обстоятельствах ее влияние может быть весьма существенным [3, 4].

### 5. Сопоставление теоретически рассчитанных значений групповых скоростей и времен прихода импульсных компонент акустического сигнала с экспериментальными оценками

В данном разделе мы сопоставим полученные описанным выше способом теоретические оценки времен прихода модальных компонент импульсного сигнала с импульсной характеристикой волновода (ИХВ), наблюдаемой в эксперименте.

При дальнейшем распространении в глубоком океане сигнал претерпевает некоторые изменения, описанные, например, в [9]. Еще более сложными могут быть закономерности формирования ИХВ при распространении звука с шельфа в глубокий океан [5]. Общим местом, однако, является наличие в таких ИХВ локальных максимумов, которые обычно соответствуют модам или группам мод волновода. Отчасти относительное положение этих максимумов [5] может определяться межмодовой дисперсией на шельфовом участке трассы. Так или иначе, по нашему мнению, весьма информативным является сопоставление времен прихода отдельных модальных компонент с экстремумами ИХВ. В случае, когда гидрологическая обстановка вдоль трассы известна достаточно хорошо, оказывается возможным установить практически взаимно однозначное соответствие

между максимумами ИХВ и теоретически оцененными временами прихода (см. работу [5]).

Выполним сопоставление структуры ИХВ с теоретическими оценками  $t_j$  для акустической трассы длиной 212 км (рис. 7).

Из рис. 7, б видно, что моды малых номеров (1–6) концентрируются в окрестности главного максимума ИХВ. Для оценки дисперсии сигнала в эксперименте выберем два наиболее выраженных максимума справа и слева от главного (глобального), отмеченных на рис. 7 окружностями, и сопоставим оценки их времен прихода и групповых скоростей с результатами расчетов  $v_j^g$  и  $t_j$  модальных компонент 1–8. Данное сопоставление приведено в таблице.

В силу различимости главного и побочных максимумов на ИХВ данное предположение может быть использовано для получения экспериментальных оценок разброса групповых скоростей при приосевом распространении. Также эти оценки достаточно хорошо согласуются высокую степень согласия с теоретическими, что проиллюстрировано на рис. 7. Действительно, если соотносить экспериментальные оценки  $t_j, v_j^g$  с теоретическими (см. таблицу), то можно говорить о масштабах расхождений в 0.1–0.15 с и 1–1.5 м/с соответственно (для мод 1–8).

Отметим еще, что как и в работах [5, 9], теоретические оценки свидетельствуют о наличии плотной группы приходов мод малых номеров. В нашем случае ее формируют моды 1–5 или 1–6. Качественное объяснение причины формирования этой группы дано в работе [4], ее также можно отождествить со слабо расходящимся пучком в ПЗК. Из общих соображений ясно, что именно эту группу следует ассоции-

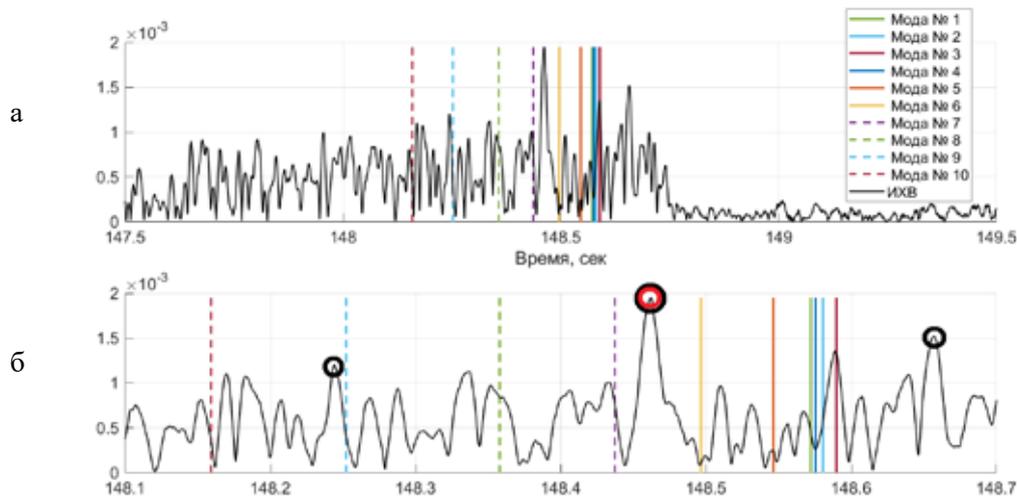


Рис. 7. Теоретически рассчитанные времена прихода модальных компонент акустического сигнала, наложенные на экспериментальную импульсную характеристику волновода, наблюдаемую в эксперименте для трассы длиной 212 км: полная ИХВ (а) и участок ИХВ с наиболее выраженными максимумами (б). Также выделены максимумы – главный (черно-красная окружность) и побочные (черные окружности)

Экспериментальные оценки  $v_j^s$  и  $t_j$  для трассы длиной 212 км и их теоретически рассчитанные значения

Экспериментальные оценки	Левый максимум		Главный максимум		Правый максимум		
$v_j^s$ , м/с	1451.68		1449.55		1447.65		
$t_j$ , сек	148.24		148.46		148.66		

Теоретические оценки для j-й модальной компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8
$v_j^s$ , м/с	1448.47	1448.39	1448.30	1448.44	1448.72	1449.21	1449.79	1450.56
$t_j$ , сек	148.57	148.58	148.59	148.58	148.55	148.50	148.43	148.36

ровать с главным (глобальным) максимумом ИХВ и, более того, именно групповые скорости входящих в нее мод следует использовать для оценки дистанции до излучателя, если время определяется по положению главного максимума (рис. 8).

Заметим также, что диапазон рассчитанных времен прихода мод 1–10 приблизительно соответствуют интервалу ИХВ между правым и левым побочным максимумами. Хотя в данном случае (по контрасту с [5]) не удастся ассоциировать отдельные локальные максимумы ИХВ с модами, в целом наши теоретические представления относительно дисперсии сигнала хорошо отражают наблюдаемую в эксперименте картину явления.

Можно объяснить более низкий в сравнении с [5] уровень точности предсказания времен прихода модальных компонент следующим образом. Модель циркуляции NEMO ассимилирует данные измерений ARGO, получаемых с помощью глобальной сети дрейфующих/ныряющих океанографических буев в реальном времени. Вместе со спутниковыми наблюдениями система ARGO составляет инструментальную часть глобальной оперативной океанографиче-

ской системы. В настоящий момент в нее включен 3951 буй, работа которых представляет собой циклическое исследование пространственного распределения солености и температуры морской воды. Буй измеряет данные характеристики, свободно перемещаясь по течению на глубине до 2000 метров в течении 10 суток, после чего происходит всплытие на поверхность, передача записанной информации на орбитальный спутник и последующее погружение – буй рассчитан на 150 таких циклов [10].

Ключевое различие в успешности применения нашей методики к экспериментам в Японском и Охотском морях объясняется пространственным распределением буев ARGO по Мировому океану [11] (рис. 9).

Данное различие является ключевым в смысле предсказательной способности модели NEMO для Охотского моря. (Поскольку калибровка модели в случае Охотского моря не включает в себя ассимиляцию данных прямых измерений, выполняемых с помощью буев, то поле скорости звука (особенно на больших глубинах) воспроизводится менее точно, чем в случае Японского моря, что не может не сказаться на точности вычисления  $v_j^s$ .

С другой стороны, даже без ассимиляции моделью реальных данных предоставляемые ей поля скоростей звука в океане вполне возможно использовать для сопоставления теоретически рассчитанных  $t_j$  с максимумами ИХВ. Как показано на рис. 7, основные закономерности дисперсии импульсного сигнала, наблюдаемой в эксперименте, доста-

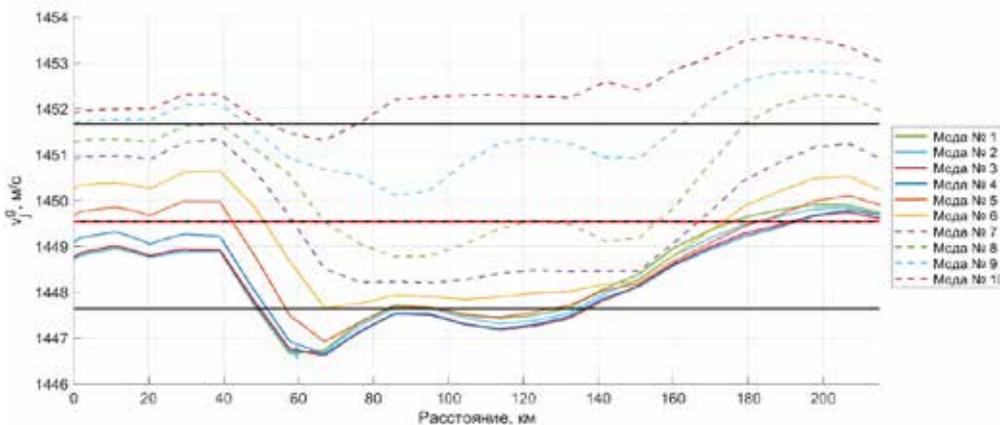


Рис. 8. Усредненные значения  $v_j^s$  вдоль акустической трассы с наложенными экспериментальными оценками. Горизонтальные линии соответствуют скоростям, определяемым по главному и побочным максимумам ИХВ, наблюдаемым в эксперименте



Рис. 9. Пространственное распределение буев ARGO по состоянию на 20.04.2022. Хорошо заметно численное превосходство буев ARGO в акватории Японского моря

точно хорошо воспроизводятся с помощью расчета групповых скоростей мод согласно предложенной нами методике.

## Заключение

Правильная теоретическая оценка скорости распространения модальных компонент импульсного акустического сигнала является ключевым этапом решения задач акустической дальнометрии. Для успешного определения этих скоростей необходима информация о вертикальных распределениях скоро-

стей звука в водной толще, также данные о рельефе дна между приемником и источником. Наиболее перспективным источником гидрологической информации нам представляются модели глобальной циркуляции океана, дающие информацию о поле скорости звука, которая может быть использована для теоретических оценок времен прихода модальных компонент импульсного акустического сигнала.

Изложенная методика позволяет с высокой точностью рассчитывать групповые скорости и времена прихода модальных компонент акустического сигнала при использовании данных модели циркуляции океана. Указанная точность обеспечивается гораздо более высоким пространственным разрешением модельных данных по сравнению с экспериментальными.

Отметим, что ключевой особенностью данной методики является чувствительность к степени ассимиляции моделью реальных океанографических данных. Как показано выше, в случае с Охотским морем ассимиляция этих данных невозможна вследствие отсутствия в данном регионе буев ARGO. Тем не менее даже в этом случае предоставляемые моделью данные позволяют решить задачу оценки групповых скоростей модальных компонент путем их усреднения вдоль акустической трассы, при этом ее адекватность может быть проверена сопоставлением максимумов ИХВ и теоретически рассчитанных времен прихода.

Математическая часть данной работы выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 22-11-00171 (<https://rscf.ru/project/22-11-00171/>), экспериментальные исследования – в рамках тем государственного задания ТОИ ДВО РАН (регистрационные номера АААА-А17-117030110034-7 и АА-АА-А20-120031890011-8).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Jensen F.B., Porter M.B., Kuperman W.A., Schmidt H. Computational ocean acoustics. New-York: Springer, 2011.
2. Петров П.С., Голов А.А., Безответных В.В., Буренин А.В., Козицкий С.Б., Сорокин М.А., Моргунов Ю.Н., Экспериментальное и теоретическое исследование времен прихода и эффективных скоростей при дальнем распространении импульсных акустических сигналов вдоль кромки шельфа в мелком море // Акуст. журнал. 2020. Т. 66, № 1. С. 20–33.
3. Голов А.А., Моргунов Ю.Н., Сорокин М.А., Петров П.С., Результаты экспериментальных и теоретических исследований распространения импульсных сигналов в мелком море вдоль кромки континентального шельфа // Подводные исследования и робототехника. 2020. №1(31). С. 36–41.
4. Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Буренин А.В., Петров П.С. Исследования пространственно-временной структуры акустического поля, формируемого в глубоком море источником широкополосных импульсных сигналов, расположенным на шельфе Японского моря // Акуст. журнал. 2019. Т. 65, № 5. С. 641–649.
5. Сорокин М.А., Петров П.С., Каплуненко Д.Д., Голов А.А., Моргунов Ю.Н., Прогноз эффективной скорости распространения акустических сигналов на основе модели циркуляции океана // Акуст. журнал. 2021. Т. 67, № 5. С. 521–532.
6. Сорокин М.А., Петров П.С., Каплуненко Д.Д., Степанов Д.В., Моргунов Ю.Н., Оценка влияния синоптических вихрей на точность решения задач акустической дальнометрии // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 4(34). С. 53–60.
7. Madec G., and the NEMO team, NEMO ocean engine // Note du Pole de modelisation, Institut Pierre-Simon Laplace. 2008. №27. P. 1288–1619.
8. Тыщенко А.Г., Заикин О.С., Сорокин М.А., Петров П.С., Комплекс программ для расчета акустических полей в мелком море на основе метода широкоугольных модовых параболических уравнений // Акуст. журнал. 2021. Т. 67. № 5. С. 533–541.
9. Wu M., Barmin M.P., Andrew R.K., P.B. Weichman, White A.W., Lavelly E.M., Dzieciuch M.A., Mercer J.A., Worcester P.F. and Ritzwoller M.H. Deep water acoustic range estimation based on an ocean general circulation model: Application to PhilSea10 data // The Journal of the Acoustical Society of America. 2019. No. 146. P. 4754–4773.
10. <https://argo.ucsd.edu/faq/>
11. <https://www.ocean-ops.org/board/?t=argo>

## Об авторах

**СОРОКИН Михаил Андреевич**, старший инженер

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева  
Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

**Область научных интересов:** акустика океана, уравнения в частных производных, математическое моделирование, метод параболического уравнения

Тел.: 8(914)6972958

E-mail: mikhapilot@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8933-2834

**ПЕТРОВ Павел Сергеевич**, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева  
Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

**Область научных интересов:** акустика океана, уравнения в частных производных, математическое моделирование, метод параболического уравнения

Тел.: 8(914)9602192

E-mail: petrov@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0002-0087-6681

**КАПЛУНЕНКО Дмитрий Дмитриевич**, к.г.н., старший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева  
Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

**Область научных интересов:** геофизическая гидродинамика, моделирование глобальной циркуляции, дальневосточные моря России

Тел.: 8(902)5246165

E-mail: dimkap@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0002-7791-6733

**ГОЛОВ Александр Александрович**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева  
Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

**Область научных интересов:** акустика океана, акустическая навигация, акустическая дальнометрия, звукоподводная связь, акустическая томография

Тел.: 8(950)2917449

E-mail: golov\_alexander@inbox.ru

ORCID: 0000-0002-7160-0076

**МОРГУНОВ Юрий Николаевич**, д.т.н., заведующий лабораторией

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева  
Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

**Область научных интересов:** акустика океана, акустическая навигация, акустическая дальнометрия, звукоподводная связь, акустическая томография

Тел.: 8(908)4493745

E-mail: morgunov@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0002-1961-1915

## Для цитирования:

Сорокин М.А., Петров П.С., Каплуненко Д.Д., Голов А.А., Моргунов Ю.Н. К ВОПРОСУ О ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОЦЕНКАХ ГРУППОВЫХ СКОРОСТЕЙ МОДАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ ИМПУЛЬСНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ПРОТЯЖЕННЫХ ТРАССАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ОКЕАНА // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 2 (40). С. 54–64. DOI: 10.37102/1992-4429\_2022\_40\_02\_06. EDN: SPYKLG.

