

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВОЛНОВОДНЫХ МОД НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ШУМОВ СУДНА С ПОМОЩЬЮ ДВУХ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ АНТЕНН

© 2022 г. М. В. Ярина^{a, *}, А. А. Луньков^{b, **}, О. А. Годин^{c, ***}, Б. Г. Кацнельсон^{a, ****}

^a*L. Charney School of Marine Sciences, University of Haifa, 199 Aba Khoushy Ave, Haifa, 3498838 Israel*

^b*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, ул. Вавилова 38, Москва, 119991 Россия*

^c*Physics Department, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 93943 USA*

^{*}*e-mail: myarina@campus.haifa.ac.il*

^{**}*e-mail: lunkov@kapella.gpi.ru*

^{***}*e-mail: oagodin@nps.edu*

^{****}*e-mail: bkatsnels@univ.haifa.ac.il*

Поступила в редакцию 07.03.2022 г.

После доработки 16.03.2022 г.

Принята к публикации 30.03.2022 г.

Предложен подход к оценке дисперсионных характеристик волноводных мод на основе анализа шума корабля, зарегистрированного двумя близкорасположенными и синхронизированными вертикальными антеннами. С помощью предложенного подхода осуществлено экспериментальное исследование модовой структуры низкочастотного звукового поля в мелководном волноводе с газонасыщенным дном в широкой полосе частот (от 20 до 250 Гц). Эксперимент был проведен в озере Кинерет (Израиль), известном высоким содержанием метановых пузырьков в осадочном слое (~1%) и, следовательно, низкой скоростью звука в этом слое (~100 м/с). Максимальная глубина в области проведения эксперимента – 40.4 м. Приемной системой являлись две 27-метровые вертикальные антенны, расположенные на расстоянии 40 м друг от друга и перекрывающие часть волновода ниже термоклина. Источник шума – исследовательское судно “Хермона” – двигалось вдоль прямой линии, соединяющей антенны, на расстояниях до 1 км от них. Предложенный подход позволил выделить частотные зависимости фазовых скоростей для первых 12 мод, причем эти зависимости оказались близки аналогичным зависимостям для волновода с абсолютно мягким дном за исключением области частот, находящейся вблизи частоты отсечки. Обсуждаются ограничения и возможное развитие предложенной методики.

Ключевые слова: акустика мелкого моря, вертикальные приемные антенны, шум корабля, газонасыщенные осадки

DOI: 10.31857/S0320791922040141

ВВЕДЕНИЕ

Исследование шумов корабля в океане на разных расстояниях от него, а также использование этих шумов для решения обратной задачи привлекает в последнее время внимание по нескольким причинам:

– Активное судоходство и постоянное присутствие интенсивного шума под водой.

– Большая часть энергии шума находится в низкочастотной области: типичный спектр корабельного шума является нерегулярным с набором дискретных составляющих и находится в основном в области частот от 20 до 200–300 Гц. Это, во-первых, обеспечивает достаточно дальнее распространение звука и его проникновение в дно, что может быть использовано при решении об-

ратных задач, а во-вторых, позволяет минимизировать использование массивных низкочастотных излучателей звука.

Среди исследований возможности применения шумов корабля для определения характеристик подводной среды и дна можно выделить следующие работы. В работе [1] исследуется выделение антропогенных и естественных компонентов шума в океане, в работе [2] рассматривается возможность использования шумящей линии (трассы судоходства) как нелокального источника шума для пассивной диагностики температурного фронта в районе Ушант. В статье [3] для записи шума использовалась буксируемая горизонтальная антенна, с дальнейшим решением обратной задачи. Источником шума являлось само судно-

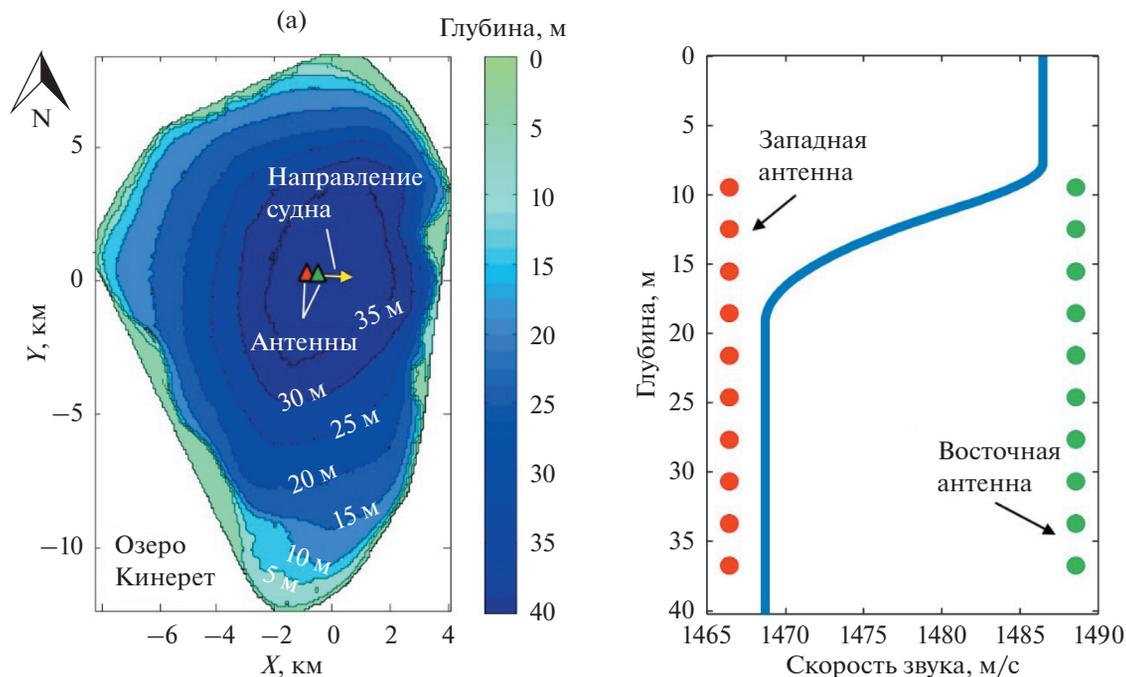


Рис. 1. (а) – Батиметрическая карта озера с указанием мест расположения антенн и траектория движения судна; (б) – вертикальный профиль скорости звука в водном слое и глубины расположения гидрофонов на антеннах.

буксировщик. В работе [4] запись шума движущегося корабля производилась на вертикальную антенну с последующим выделением волноводных мод, определением их коэффициентов затухания и оценкой скорости звука в дне на основе этих коэффициентов. В работе [5] запись шума корабля производилась с помощью автономного необитаемого подводного аппарата в очень мелкой воде, с дальнейшей оценкой скорости продольных волн в дне. Обратная задача по определению параметров дна решалась также на основе данных эксперимента Shallow Water 2006 [6], используя запись шума корабля на L-образной антенне.

В отличие от приведенных выше работ, в настоящей работе анализ шума движущегося судна осуществляется сразу на двух синхронизированных близкорасположенных вертикальных цепочках гидрофонов (антенн), перекрывающих большую часть волновода по глубине, с когерентной обработкой сигналов одновременно с двух этих цепочек. Исследования проводятся в мелководном волноводе с газонасыщенным верхним слоем донных осадков (озеро Кинерет, Израиль).

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема натурного эксперимента показана на рис. 1 и 2. Эксперимент проводился в озере Кинерет в его центральной части, где глубина составляет примерно 40.4 м, а профиль скорости звука $c(z)$ характеризуется заметным скачком на глуби-

не 10–15 м (рис. 1б). Дно акватории покрыто газонасыщенными осадками, концентрация газа в которых максимальна именно в центре озера [7]. Приемная система представляла собой две вертикальные синхронизированные цепочки гидрофонов (рис. 1б и 2), закрепленные на дне около заякоренной платформы, на расстоянии примерно $\Delta r = 40$ м друг от друга, одну из которых будем условно называть западной (W), а другую – восточной (E). Каждая из цепочек состояла из $N = 10$ гидрофонов, расположенных с шагом $\Delta z = 3$ м, и перекрывала диапазон глубин от 10 до 37 м.

На схеме эксперимента на рис. 2 показано движение источника шумового сигнала – НИС “Хермона” – вдоль прямой линии, проходящей через обе антенны, причем восточная цепочка всегда была ближайшей к судну. В работе рассматривается промежуток времени ~ 5 мин, в течение которых судно двигалось со скоростью 4 м/с в направлении от антенн на максимальное удаление 1000 м. Пример спектра шумового сигнала, принятого на разных гидрофонах западной антенны, приведен на рис. 3а, а усредненные по гидрофонам спектры на двух антеннах показаны на рис. 3б. Как видно, спектр шума корабля имеет заметные максимумы в области 20–30 и 80–100 Гц. В то же время на более высоких частотах спектр является достаточно равномерным.

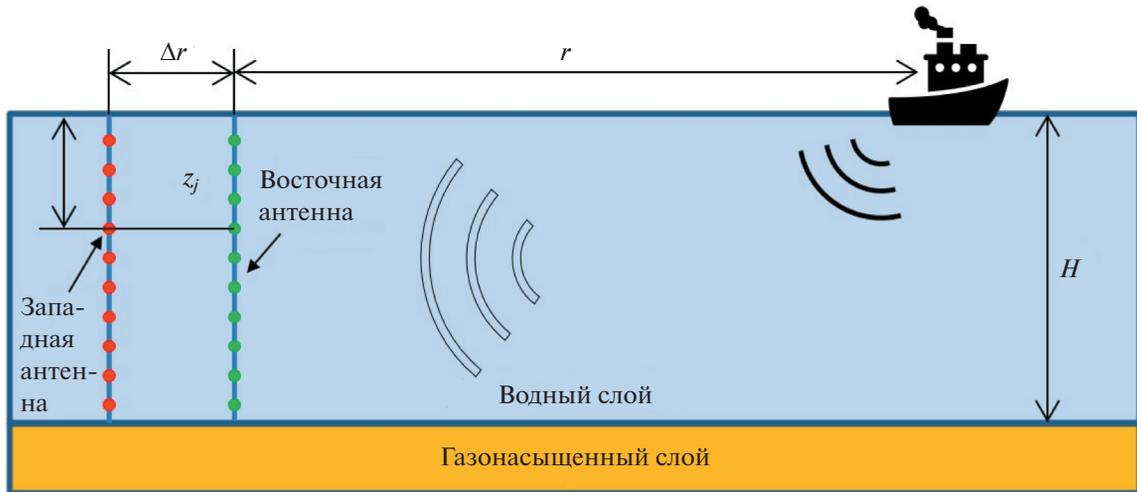


Рис. 2. Общая схема проведения эксперимента.

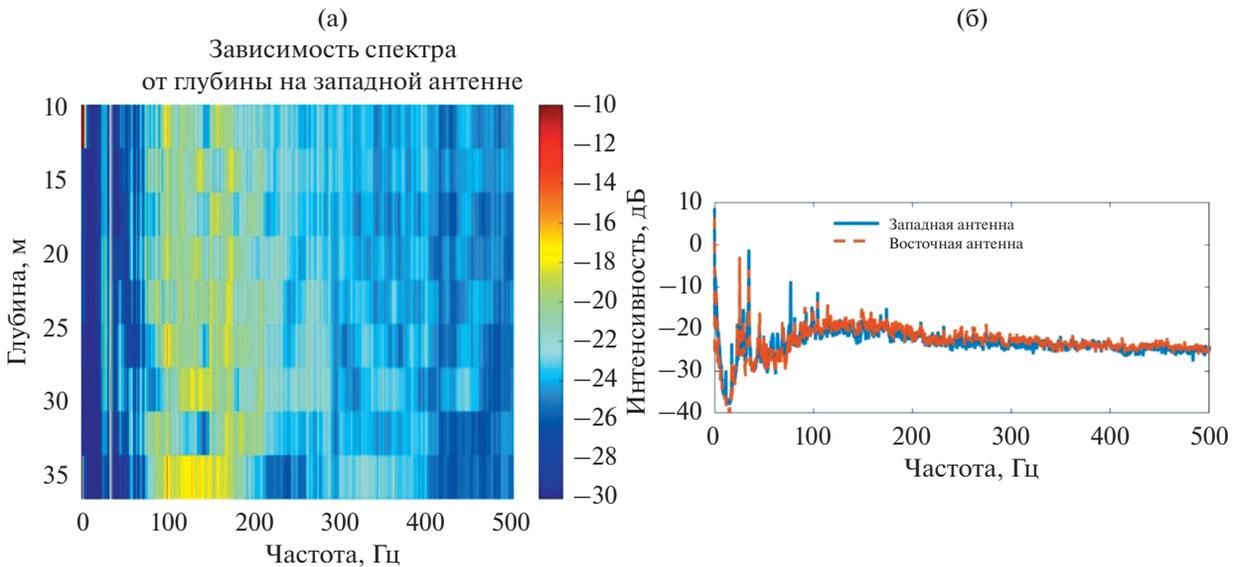


Рис. 3. (а) – Пример спектра сигнала, принятого на гидрофоны западной антенны; (б) – усредненные по элементам антенны спектры принятого сигнала на восточной и западной антеннах. Спектры нормированы на максимальное значение в диапазоне 20–500 Гц.

3. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Рассмотрим поле от шумового источника, записанное на двух антеннах (восточной – E, западной – W), а именно временную зависимость звукового давления на различных гидрофонах $P^E(t, z_j)$ и $P^W(t, z_j)$, где z_j – глубина гидрофона, t – “быстрое” время во временном интервале движения судна. После вычисления спектрограмм как функций частоты $\omega = 2\pi f$ и “медленного” времени T в промежутке от 0 до 5 мин, мы получим функции $P^E(\omega, T, z_j)$ и $P^W(\omega, T, z_j)$, со-

ответственно. Примеры спектрограмм шума корабля приведены на рис. 4 для центральных гидрофонов обеих антенн. При взятии спектрограммы ширина окна выбиралась равной 1 с, соседние окна не перекрывались.

В предположении о регулярном волноводе с постоянной глубиной H на участке движения корабля и известном профиле скорости звука в водном слое $c(z)$, определим волноводные моды $\psi_m(z, \omega)$ как решения задачи Штурма–Лиувилля на собственные значения:

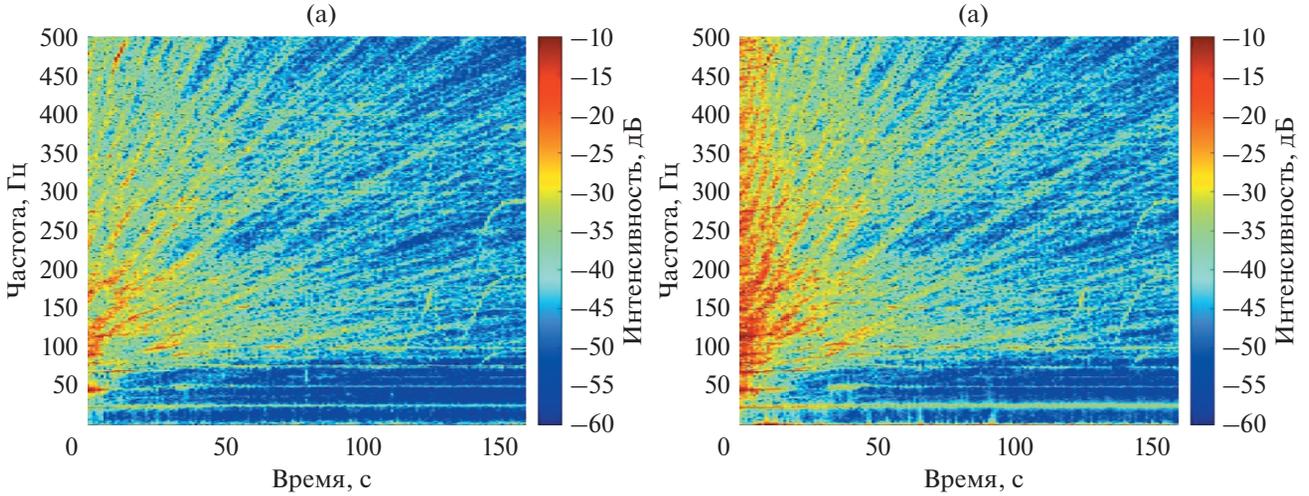


Рис. 4. Спектрограммы шума корабля, зарегистрированного на центральных гидрофонах (а) – западной и (б) – восточной приемных антенн.

$$\frac{d^2 \psi_m(z, \omega)}{dz^2} + (\omega^2/c^2(z) - \xi_m^2) \psi_m(z, \omega) = 0 \quad (1)$$

с соответствующими граничными условиями на поверхности ($\psi_m(0, \omega) = 0$) и дне (непрерывность ψ и отношения $\frac{1}{\rho} \frac{d\psi}{dz}$ при $z = H$, где ρ – плотность среды), $\xi_m = q_m + i\gamma_m/2$ – комплексные собственные значения.

Особенность данной задачи состоит в том, что свойства дна нам не известны, и мы не можем использовать граничные условия при $z = H$. Однако в нашем распоряжении имеются записи звукового поля на двух антеннах. Представим далее схему нахождения собственных функций и собственных значений с использованием шума судна и двух синхронизированных антенн.

Построим решение уравнения

$$\frac{d^2 \psi(z, \omega, q)}{dz^2} + (\omega^2/c^2(z) - q^2) \psi(z, \omega, q) = 0 \quad (2)$$

с граничным условием $\psi(\omega, q, 0) = 0$, с непрерывным изменением параметра q . Найдем далее коэффициенты разложения спектрограмм, где вместо непрерывной величины z используются дискретные значения глубины (глубины 10 гидрофонов z_j), эти коэффициенты являются функциями параметра q , частоты ω и медленного времени T :

$$A^E(\omega, T, q) = \sum_{j=1}^N P^E(\omega, T, z_j) \psi(z_j, \omega, q) \Delta z, \quad (3)$$

$$A^W(\omega, T, q) = \sum_{j=1}^N P^W(\omega, T, z_j) \psi(z_j, \omega, q) \Delta z. \quad (4)$$

Далее запишем отношение амплитуд A^E и A^W с учетом компенсации фазового сдвига на расстоянии Δr между антеннами, возьмем действительную часть и усредним по медленному времени (или по расстоянию от антенн до корабля), что даст:

$$R(\omega, q) = \left\langle \text{Re} \left(\frac{A^E(\omega, T, q)}{A^W(\omega, T, q)} \exp(iq\Delta r) \right) \right\rangle_T. \quad (5)$$

При обработке экспериментальных данных нами бралось медианное среднее. Построим далее функцию R в координатах (ω, v_{ph}) , где $v_{ph} = \omega/q$ – фазовая скорость. Результат построения показан на рис. 5 в обычном (рис. 5а) и укрупненном (рис. 5б) масштабах. Наблюдаемые на этой плоскости области максимумов в виде гипербол соответствуют дисперсионным зависимостям – зависимости фазовой скорости волноводной моды $v_{ph,m}$ от частоты ω – для 12 мод. На этих рисунках белым цветом показаны также дисперсионные кривые мод для волновода с абсолютно мягким дном и постоянной скоростью звука в водном

слое $c_0 = \min_z(c(z))$:
$$v_{ph,m}^0(\omega) = \frac{\omega}{\sqrt{\left(\frac{\omega}{c_0}\right)^2 - \left(\frac{\pi m}{H}\right)^2}},$$

где m – номер моды. Экспериментальные зависимости $v_{ph,m}(\omega)$ оказались близки аналогичным зависимостям для волновода с абсолютно мягким дном $v_{ph,m}^0(\omega)$ за исключением области частот, находящейся вблизи частоты отсечки (см. рис. 5а).

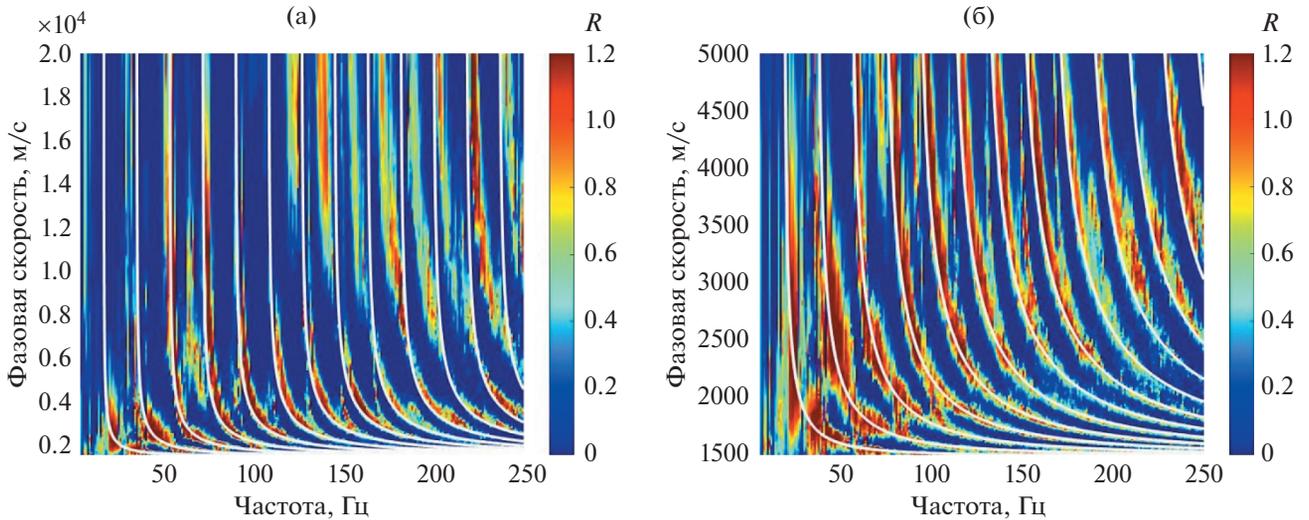


Рис. 5. (а) – Распределение величины R в координатах (ω, V_{ph}) – частота звука и фазовая скорость моды; (б) – укрупненное изображение этого же распределения. Белыми гиперболами показаны дисперсионные кривые для мод в волноводе с абсолютно мягким дном.

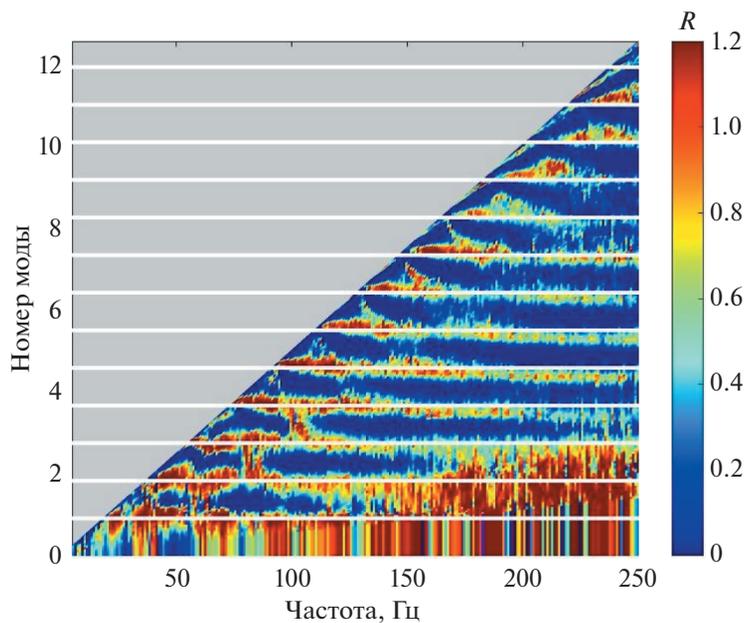


Рис. 6. Распределение величины R в координатах (ω, m^*) – частота звука и “номер” моды. Белые горизонтальные прямые проведены для целочисленных значений номера моды: $m^* = 1, 2, 3, \dots$. Серая треугольная область соответствует частотам ниже частоты отсечки для волновода с абсолютно мягким дном.

Представляет интерес изобразить рис. 5а в координатах (ω, m^*) , где

$$m^*(\omega) = \frac{H\sigma_m(\omega)}{\pi} = \frac{\omega H}{\pi} \max_z \left(\sqrt{\frac{1}{c^2(z)} - \frac{1}{v_{ph,m}^2(\omega)}} \right)$$

– “номер” моды в предположении абсолютной мягкости дна. (Нетрудно показать, что эти зави-

симости описывают также дисперсионные кривые “вытекающих” мод в однородном водном слое над жидким полупространством, где скорость звука много меньше скорости звука в воде.) Результат такого построения показан на рис. 6. Незакрашенная область соответствует частотам ниже частоты отсечки для идеального волновода, т.е. когда подкоренное выражение отрицательно.

Белыми прямыми на этом же рисунке отмечены целочисленные значения номеров мод. Как видно, наблюдаемые максимумы $R(\omega, m^*)$ в большинстве случаев хорошо ложатся на теоретические прямые.

Помимо этого, на основе полученных $v_{ph}^m(\omega)$ можно найти собственные значения, точнее их вещественные части, как функцию частоты $q_m(\omega)$. Зная собственные значения, соответствующие модальные амплитуды на антеннах можно записать как $A_m^E(\omega, T) \equiv A^E(\omega, T, q_m(\omega))$ и $A_m^W(\omega, T) \equiv A^W(\omega, T, q_m(\omega))$, а их отношение в виде $R_m(\omega, T) = A_m^E(\omega, T) / A_m^W(\omega, T)$. Сравнение амплитуд мод на двух антеннах позволяет оценить модальные коэффициенты затухания на разных частотах:

$$R_m(\omega) = \left\langle \operatorname{Re} \left(\frac{A_m^E(T)}{A_m^W(T)} \exp(iq_m(\omega) \Delta r) \right) \right\rangle_T \approx \exp\left(\frac{\gamma_m(\omega)}{2} \Delta r\right). \quad (6)$$

Отсюда коэффициент потерь моды

$$\gamma_m(\omega) = \frac{2 \ln R_m(\omega)}{\Delta r}. \quad (7)$$

Применение такой обработки к имеющимся экспериментальным данным выходит за рамки настоящей работы и будет рассмотрено отдельно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен новый подход к разделению нормальных мод и оценке их параметров с помощью анализа шума корабля, регистрируемого двумя синхронизированными близкорасположенными антеннами. Преимуществом данного подхода является отсутствие необходимости знать точные координаты и скорость движения корабля — достаточно знать только то, что он движется по прямой, проходящей через обе антенны. Предложенный подход позволяет оценивать дисперсионные характеристики мод, что было продемонстрировано при обработке натуральных данных, а также, в теории, определять частотную зависимость модальных коэффициентов затухания.

Отметим, что описанный выше эксперимент в озере Кинерет представляет собой первую попытку

использования предложенного подхода. Тот же метод, по-видимому, можно применить в мелком море при произвольной траектории шумящего судна, если эта траектория известна. Благодаря характеру обработки сигналов, высокая степень точности описания траектории судна не требуется. Данный подход продемонстрировал устойчивость к наблюдавшимся сильным псевдоакустическим шумам. Тем не менее, точность извлечения дисперсионных кривых повысится, если конструкция антенн будет способствовать подавлению собственных шумов, связанных с обтеканием антенн и их механическими колебаниями, в используемой полосе шумов судна. Дополнительные исследования требуются для определения оптимального для решения обратных задач расстояния между вертикальными антеннами.

Работа поддержана РФФИ, проект 20-05-00119.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mustonen M., Klauson A., Folégot T., Clorennec D.* Natural sound estimation in shallow water near shipping lanes // *J. Acoust. Soc. Am.* 2020. V. 147. P. EL177-EL183. <https://doi.org/10.1121/10.0000749>
2. *Chailloux C., Kinda B., Bonnel J., Gervaise C., Stephan Y., Mars J., Hermand J.* Modelling of ambient noise created by a shipping lane to prepare passive inversion: Application to Ushant // *Proc. of the 4th Underwater Acoustics Measurements Conference (UAM)*. 2011. V. 26.
3. *Battle D.J., Gerstoft P., Kuperman W.A., Hodgkiss W.S., Siderius M.* Geoacoustic inversion of tow-ship noise via near-field-matched-field processing // *IEEE J. Oceanic Eng.* 2003. V. 28(3). P. 454–467.
4. *Lunkov A., Katsnelson B.* Using discrete low-frequency components of shipping noise for gassy sediment characterization in shallow water // *J. Acoust. Soc. Am.* 2020. V. 147(5). P. EL428–EL433.
5. *Crocker S.E., Nielsen P.L., Miller J.H., Siderius M.* Geoacoustic inversion of ship radiated noise in shallow water using data from a single hydrophone // *J. Acoust. Soc. Am.* 2014. V. 136(5). P. EL362–EL368.
6. *Stotts S.A., Koch R.A., Joshi S.M., Nguyen V.T., Ferreri V.W., Knobles D.P.* Geoacoustic inversions of horizontal and vertical line array acoustic data from a surface ship source of opportunity // *IEEE J. Ocean. Eng.* 2010. V. 35(1). P. 79–102.
7. *Katsnelson B., Katsman R., Lunkov A., Ostrovsky I.* Acoustical methodology for determination of gas content in aquatic sediments, with application to Lake Kinneret, Israel, as a case study // *Limnology and oceanography: methods*. 2017. V. 15(6). P. 531–541.