
АКУСТИКА ОКЕАНА.
ГИДРОАКУСТИКА

УДК 551.466.8

АКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ВНУТРЕННИХ ВОЛН НА ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

© 2022 г. В. В. Гончаров^а, *, **Б. Ф. Курьянов^а**, А. Н. Серебряный^{а, б}, **

^аИнститут океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Нахимовский пр. 36, Москва, 117997 Россия

^бАО «Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева», ул. Шверника 4, Москва, 117036 Россия

*e-mail: gvv@ocean.ru

**e-mail: serebryany@hotmail.com

Поступила в редакцию 05.03.2022 г.

После доработки 25.03.2022 г.

Принята к публикации 30.03.2022 г.

На северо-восточном шельфе Черного моря в 2010 г. был проведен томографический эксперимент по встречному распространению фазоманипулированных акустических сигналов. В течение суток велось измерение временных откликов среды при излучении и приеме высокочастотных сложных фазоманипулированных сигналов от трех донных приемно-излучающих преобразователей, расположенных в углах равностороннего треугольника со сторонами около 1100 м. Трансиверы находились на удалении более 2 км от Голубой бухты при глубине места около 40 м. Вблизи от них была установлена заякоренная гирлянда термодатчиков для регистрации внутренних волн. По данным о временной изменчивости откликов среды на акустические сигналы при помощи метода согласованных временных откликов была восстановлена информация о присутствовавших на акватории внутренних волнах. Была получена временная реализация вертикальных смещений термоклина, в которой обнаружены короткопериодные волны высотой 0.5–1 м и периодом от 5 до 15–20 мин. Сопоставление акустических измерений с независимыми контактными измерениями внутренних волн выявило их хорошее взаимное совпадение. В целом результаты проведенного акустического эксперимента показали возможность успешного использования метода акустической томографии для исследования динамики вод для условий мелкого моря.

Ключевые слова: акустическая томография, внутренние волны, шельф, Черное море

DOI: 10.31857/S0320791922040050

1. ВВЕДЕНИЕ

Акустические методы служат важным инструментом для исследований динамики морской среды, и их возможности еще не до конца исчерпаны. Акустическим институтом и Институтом океанологии РАН в течение нескольких лет проводились эксперименты с организацией акустических трасс на северо-восточном шельфе Черного моря с целью исследований особенностей происходящих здесь гидрофизических процессов [1, 2]. В каждом эксперименте на открытом шельфе устанавливалась акустическая трасса длиной в несколько километров, ориентированная параллельно береговой черте в районе Геленджика напротив Голубой бухты. В 2010 г. здесь был проведен наиболее совершенный из проведенных ранее томографический эксперимент по встречному распространению фазоманипулированных акустических сигналов с использованием трех трасс, расположенных в виде рав-

ностороннего треугольника [3]. По данным о временной изменчивости откликов среды на акустические сигналы была восстановлена картина течений и скорости звука на акватории [3, 4]. В настоящей работе мы возвращаемся к данным этого эксперимента с новым подходом к обработке данных, который дает возможность извлечения информации о внутренних волнах, присутствовавших в то время на акватории.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент проводился в течение суток с 7 по 8 октября. В расстановке эксперимента были три донно-поверхностных буя, расположенных в углах равностороннего треугольника со сторонами около 1100 м. Они находились на удалении более 2 км от Голубой бухты, где глубина моря около 40 м (рис. 1а). Подробное описание буев дано в [3]. Буи содержали обратимые акустические преобразователи, излучающие и приемные усилите-

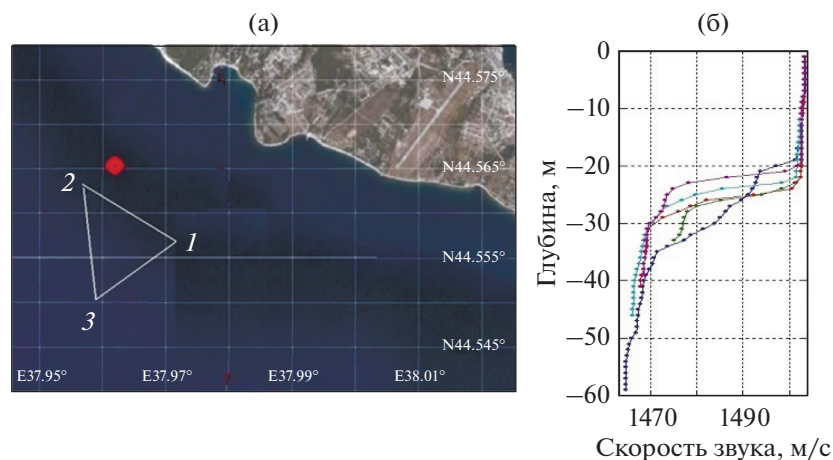


Рис. 1. (а) — Расположение трех акустических буйев на шельфе вблизи Голубой бухты и гирлянды термодатчиков (красная точка); (б) — вертикальные профили скорости звука, измеренные вблизи буйев в эксперименте.

ли сигналов, мало потребляющие компьютеры, управляющие проведением эксперимента, и системы точной временной синхронизации независимых буйев с использованием спутниковой системы GPS. Все три независимых компьютера генерировали клиппированные широкополосные m-последовательности с коэффициентом сложности 2047, средней частотой 10 кГц, шириной полосы $\sim 2\text{--}4$ кГц и длительностью ~ 1 с, а также проводили запись сигналов от других буйев с частотой выборок 100 кГц. Излучение сигналов для различных буйев производилось последовательно через каждые 3 с, так что период повторения сеансов излучения составлял 9 с. Точность синхронизации излучения различных буйев составляла ~ 10 мкс. Для получения временных откликов среды на различных трассах при обработке записанных сигналов проводилась полосовая фильтрация и вычисление функций корреляции принятых сигналов с копиями излученных. Таким образом, были получены функции откликов среды по трем трассам в прямых и обратных направлениях.

Во время работы треугольника акустических приемо-излучателей также проводились измерения фоновых гидрологических условий в море с помощью стандартных океанологических приборов. Эта информация была необходима для сопоставления с данными, полученными акустическим методом. Измерялись течения с помощью ADCP “Rio Grande 600 kHz” на разрезах акватории и на трассах распространения акустических сигналов. Велись также измерения вертикальной структуры скорости звука и температуры зондом miniSVP. Все работы проводились с малого моторного судна. Кроме того, еще до начала акустического эксперимента на глубине 34 м рядом с треугольником буйев была установлена заякоренная гирлянда из 9 термодатчиков DTcenti для не-

зависимой регистрации внутренних волн. Датчики располагались на горизонтах 4.5, 8.5, 12.5, 16.5, 20.5, 24.5, 28.5, 32.5, 33.5 м. Дискретность их измерений — 30 с.

3. ИЗМЕНЧИВОСТЬ ФОНОВЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ВО ВРЕМЯ ПРОВЕДЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Контрольные измерения за изменчивостью водной среды выявили характерные черты как в режиме прибрежных течений, так и в режиме вертикальных колебаний термоклина. По данным проведенных зондирований термоклин располагался ниже горизонта 20 м и был резким (рис. 16). Температурная структура оказывает основное влияние на скорость звука, поскольку в прибрежной зоне Черного моря соленость мало изменяется с глубиной, имея характерную величину около 18‰.

Работа акустических буйев началась 7 октября в 12 ч 39 мин и продолжалась в течение суток. Запись гирлянды термодатчиков охватывала более продолжительный период времени — она началась 2 октября и продолжалась около 12 сут (288 ч). На рис. 2 представлено изменение температурной структуры моря по данным термогирлянды за весь период ее работы. По данным термогирлянды был рассчитан спектр колебаний температуры на горизонте, который выявил выраженный пик на частоте, близкой к 0.06 ц/ч, что соответствует локальной инерционной частоте района. Внутренние инерционные волны с периодом 17 ч хорошо прослеживаются на записи термогирлянды. Их высоты достигают 15–20 м. Эти данные подтверждают факт, рассмотренный в работе [5], что на черноморском шельфе инерционные внутренние волны служат причиной значительной из-

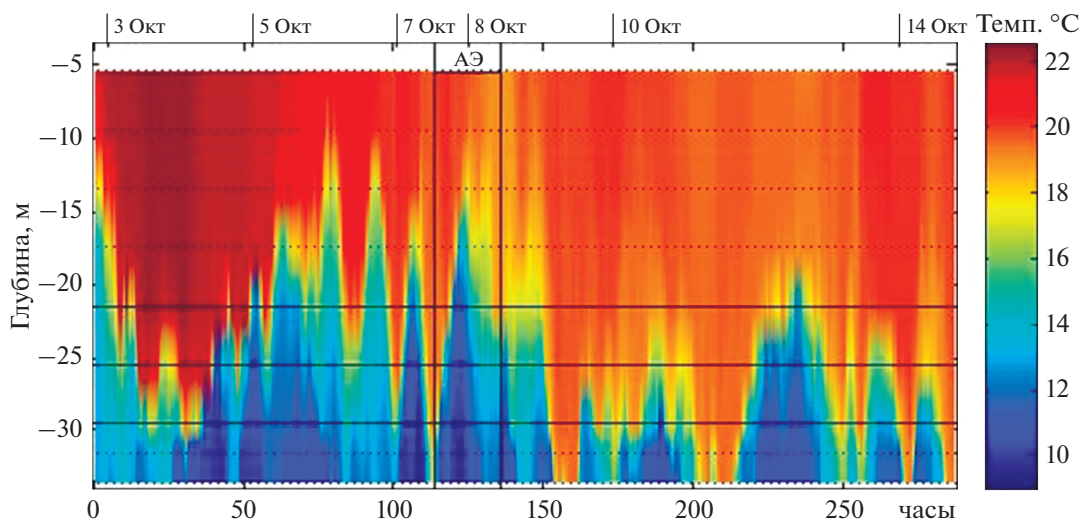


Рис. 2. Изменение температурной структуры водной толщи с 2 по 14 октября.

менчивости скорости звука, имеющей периодический характер.

На изменчивость температурной структуры помимо инерционных внутренних волн накладывали свой отпечаток еще два важных фактора. Один из них — это метеорологические условия. 3 и 4 октября дул сильный северо-восточный ветер, действие которого привело к заглублению термоклина на горизонт 30 м. 5 и 6 октября ветер ослабел и термоклин вернулся в свое исходное положение. На нем опять были замечены инерционные волны. 7 и 8 октября море было спокойным, что позволило осуществить постановку акустических буйев и провести эксперимент. 9 октября подул сильный южный ветер, что привело к полному перемешиванию воды в прибрежной зоне. На следующий день термоклин появился, но находился в придонном положении. До конца работы термогирляндой временами усиливавшееся ветровое воздействие прижимало термоклин ко дну, что препятствовало появлению инерционных внутренних волн в прибрежной зоне.

Второй фактор был связан с прохождением на акватории во время акустического эксперимента антициклонического субмезомасштабного вихря — явления, характерного для шельфовой зоны Черного моря, в том числе для данного района [6]. Вихрь был обнаружен 7 октября во время разреза с ADCP. На его присутствие указывало юго-восточное течение силой 20 см/с, которое охватывало всю акваторию эксперимента. Радиус вихря был около 4 км. 8 октября течение изменилось на противоположное северо-западное, что означало, что вихрь прошел. Результаты работы [3] продемонстрировали эффективность проведенного томографического эксперимента для определения течений в морской среде на шельфе. В ней для простых моделей среды (2 или 3 однородных

слоя), используя экспериментально полученную картину временного хода откликов среды, была восстановлена регулярная временная изменчивость вектора скорости течения и скоростей звука и показана резкая изменчивость течения, вызванная проходящим в акватории вихрем.

4. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

При обработке использовалась полученная в ходе эксперимента функция откликов среды для звуковой трассы между буйами 1 и 2 (представлена на рис. 3), которая располагалась параллельно береговой черте (см. рис. 2). Эта трасса наиболее чувствительна к воздействию внутренних волн, поскольку она совпадает с преобладающей ориентацией фронтов внутренних волн, распространяющихся в этом районе [7–10]. На картине временного хода откликов среды в первые начальные часы эксперимента (t_{exp}) достаточно четко выделяются четыре импульса, отмеченные на рисунке цифрами. В ходе эксперимента (с ростом t_{exp}) амплитуда этих импульсов существенно менялась вплоть до уровня шумов (исчезновение импульса). Поэтому для анализа использовались усредненные по различным интервалам времени эксперимента (Δt_{exp}) данные. Это позволило получить данные об изменении (в ходе эксперимента) времен прихода (T_{ek} , $k = 1, 2, 3, 4$) отдельных импульсов. В работах [3, 4] эти данные для легко разделяющихся импульсов 1 и 4 на рис. 3 были использованы для восстановления регулярной временной изменчивости параметров сравнительно простых (усредненных) моделей среды. В настоящей работе предпринята попытка связать вариации времен прихода отдельных импульсов с возможным прохождением внутренней

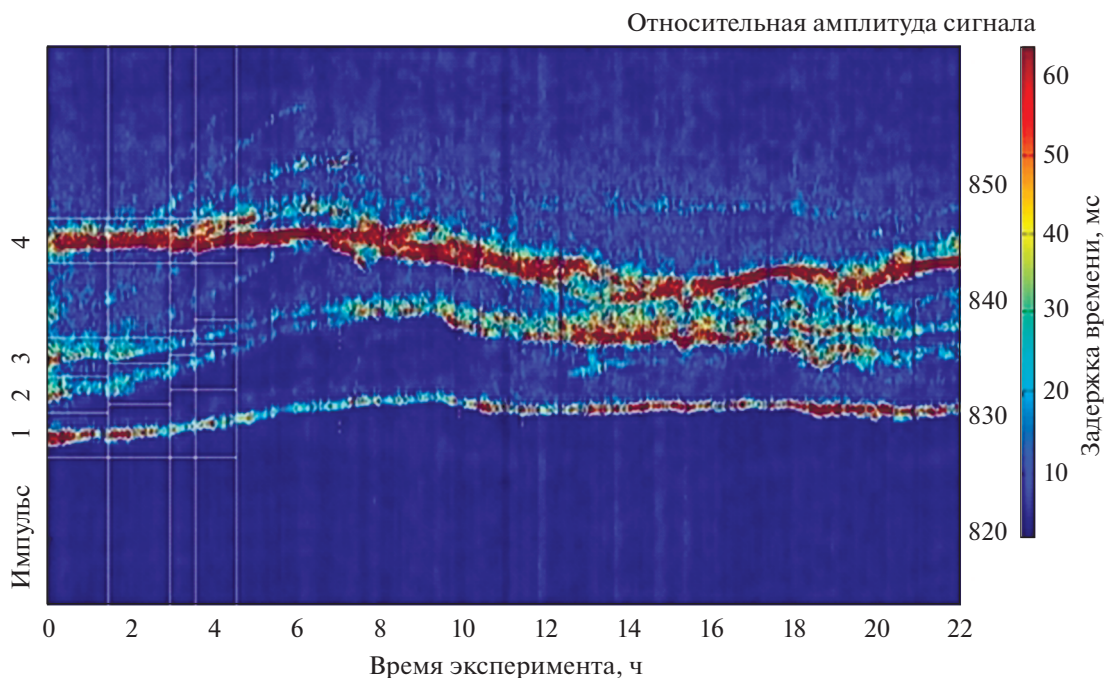


Рис. 3. Изменение времен пробега для четырех групп сигналов на трассе 1–2.

волны через звуковую трассу между буем 1 и 2. В первую очередь были выделены такие интервалы времен эксперимента, на которых отдельные импульсы 1–4 можно было бы отделить друг от друга. Эти интервалы и соответствующие им интервалы времен задержек отдельных импульсов показаны на рис. 3 белыми линиями. Легко видеть, что с ростом t_{exp} импульсы 2 и 3 сближаются, и их разделение при $t_{\text{exp}} > 270$ мин (4.5 ч) становится все более затруднительным.

Для первых 270 мин эксперимента результаты расчета времен прихода $T_{ek}(t_{\text{exp}})$ представлены на рис. 4. Здесь красные линии ($\Delta t_{\text{exp}} = 20$ мин) соответствуют регулярным изменениям параметров среды, связанным в основном с понижением ее температуры (средней скорости звука). Синие линии ($\Delta t_{\text{exp}} = 2$ мин), описывающие вариации времен прихода отдельных импульсов относительно их регулярного хода, по-видимому, обусловлены влиянием внутренних волн на время распространения звуковых сигналов.

Для восстановления параметров среды в основном использовался так называемый метод согласованных временных откликов (method of matched temporal responses), описанный в [11] и заключающийся в поиске наилучшего соответствия (наибольшей корреляции) между экспериментальным и рассчитанным для различных параметров среды импульсами. Результат такой процедуры для одного из экспериментальных импульсов в первые 90 мин эксперимента представлен на рис. 5а. Здесь черными точечными

линиями показан ряд импульсных откликов, включающих наиболее быстрые и наиболее медленные импульсы 1–4, в первые 90 мин эксперимента. Вертикальные штриховые линии на этом рисунке определяют временные интервалы возможного расположения отдельных импульсов (интервалы расчета корреляции импульсов). Соответственно черной сплошной линией показан выбранный для сравнения экспериментальный импульс. Красной штриховой линией на этом же рисунке изображен наиболее близкий к экспериментальному отклик (корреляция = 0.94), рассчитанный по 2D лучевой программе. Цветные вертикальные линии (синяя, зеленая, красная и малиновая) отвечают временам прихода лучей, формирующих импульсы 1–4 соответственно. Расчет проводился для горизонтально однородной модели среды с 10-ти точечным по глубине профилем скорости звука (ПСЗ) $c(z_n)$ ($n = 1 : 10$), исходным для которого был взят усредненный по трем профилям скорости звука, измеренным в течение 5-го часа эксперимента вблизи точек остановки автономных донных станций. Этот профиль $c_o(z_n)$ показан на рис. 5б точечной маркированной “о” линией. Варьировались как значения $c(z_n) = c_o(z_n) + \Delta c(z_n)$, так и обусловленные внутренней волной (ВВ) глубины $z_n + \Delta z_n$, где $\Delta z_n = A_{\text{inw}} \phi(z_n)$, A_{inw} – амплитуда первой моды внутренней волны, $\phi(z_n)$ – ее профиль, который в силу условий мелкого моря практически оставался неизменным в широком диапазоне частот внутренних волн. Этот профиль моды (схематично) пока-

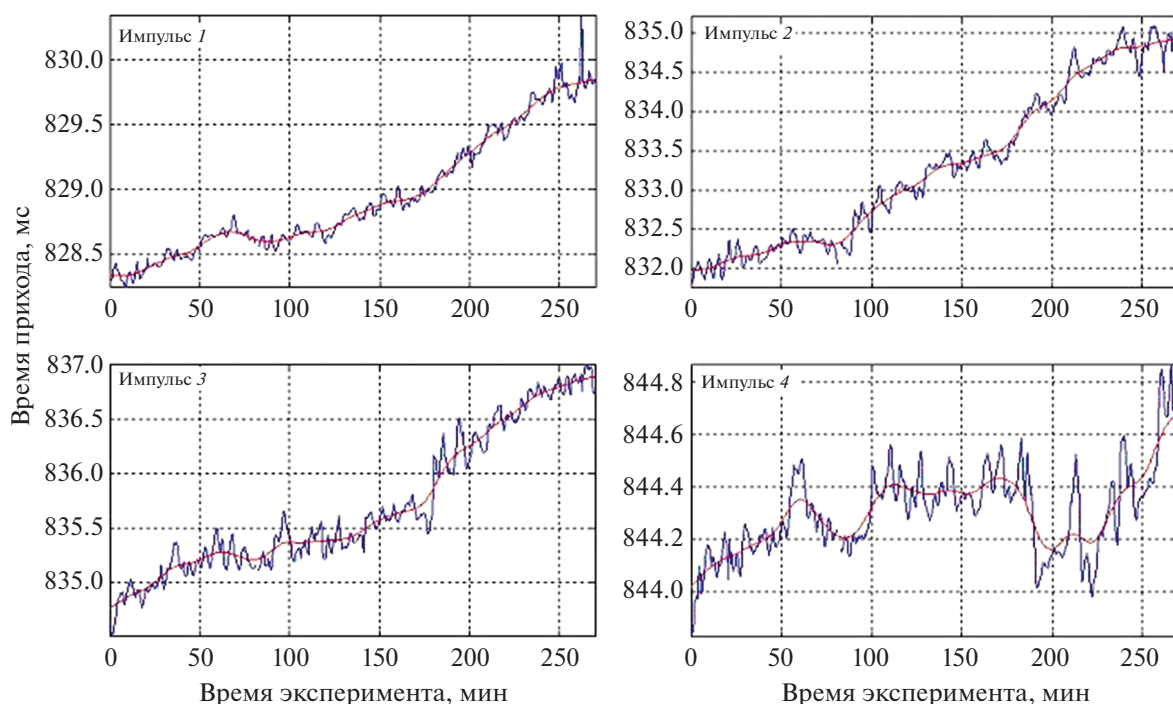


Рис. 4. Результаты расчетов времен прихода для четырех групп сигналов на трассе 1–2.

зан на рисунке штриховой линией с точками. Представленный на верхнем рис. 5а расчетный импульс соответствует профилю скорости звука, показанному красной линией на рис. 5б.

Траектории собственных лучей (СЛ), соединяющих источник и приемник и формирующих расчетный импульс, представлены на рис. 5в тем же цветом, что и времена прихода на рис. 5а (вертикальные линии). Отсюда следует, что импульс 1 отвечает в основном однократно отражившимся от поверхности лучам и, возможно (как в данном примере), лучам с точкой заворота в приповерхностных слоях воды, где СЗ близка к максимальной. Импульс 3 связан с двукратно отраженными от поверхности лучами, а импульс 4 — с лучами в придонном слое, точки заворота которых могут быть и в термоклине. И наконец, весьма узкий (по углам выхода) пучок лучей с точками заворота вблизи верхней границы термоклина содержит СЛ, формирующие импульс 2. Следует отметить, что интервал времен прихода всех СЛ из этого пучка весьма широк и соответствует (в зависимости от числа их отражений от дна) как лучам импульса 2 (чаще всего), так и лучам, близким к формирующим импульс 4. В рассмотренном случае наблюдались слабые по амплитуде лучи с тремя дополнительными отражениями от дна (бирюзовые линии на рис. 5в и точки на рис. 5а). По-видимому, именно таким лучам соответствуют слабые отклики между экспериментальными импульсами 2 и 4 на рис. 3.

Можно ожидать, что именно импульс 2 наиболее подвержен влиянию ВВ, поскольку соответствующие ему СЛ большую часть времени своего распространения проводят в области термоклина — наибольшего смещения слоев воды под действием ВВ. Поэтому особое внимание при восстановлении ВВ обращалось на согласование экспериментального и лучевого импульсов именно этого номера. В качестве исходного ПСЗ выбирался профиль, близкий к оптимальному на рис. 5б (красная линия). Затем для всех экспериментальных импульсов $P_{ek}(t, t_{\text{exp}})$ и лучевых $P_{rk}(t, \Delta c, A_{\text{inw}})$ рассчитывалась их корреляция:

$$C_k(t_{\text{exp}}, \Delta c, A_{\text{inw}}) = \int P_{ek}(t, t_{\text{exp}}) P_{rk}(t, \Delta c, A_{\text{inw}}) dt, \\ k = 1, 2, 3, 4.$$

Здесь все импульсы предполагались нормированными, так что интегрирование по времени t для каждого k -го импульса проводится по соответствующему ему интервалу (см. рис. 5а), аргумент Δc отвечает средней по глубине вариации ПСЗ. На рис. 6 представлен вид функции корреляции $C_{2n}(t_{\text{exp}}, A_{\text{inw}})$ для импульса 2 и пяти значений вариаций $\Delta c_n = (-0.5, -0.25, 0, 0.25, 0.5)$ м/с. Легко видеть, что все эти зависимости подобны друг другу и с ростом Δc_n смещаются (как целое) в направлении больших A_{inw} . Такой ход корреляционных функций $C_k(t_{\text{exp}}, \Delta c_n, A_{\text{inw}})$ объясняется тем фактом, что смещение термоклина к поверхности

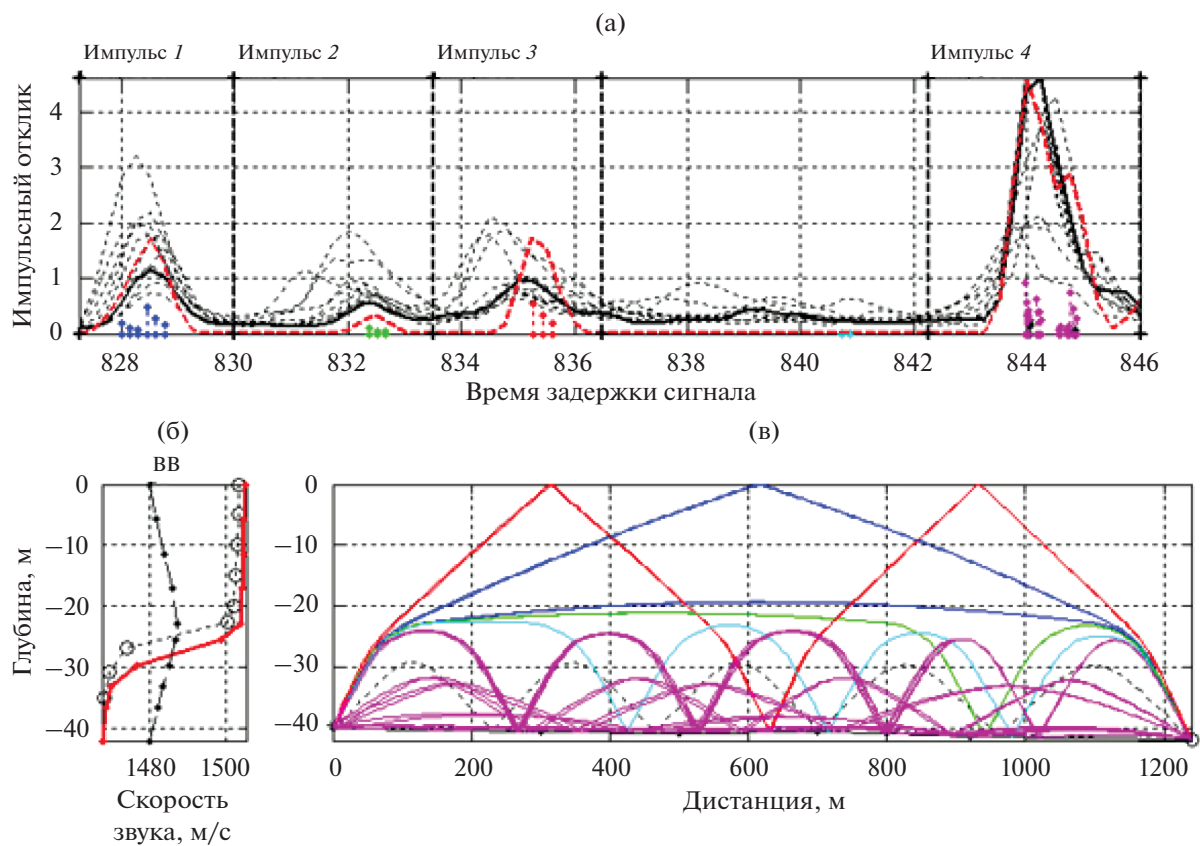


Рис. 5. (а) — Звуковые сигналы в первые 90 мин эксперимента. Сплошная линия и точки — эксперимент; штриховая — лучевой расчет, вертикальные линии соответствуют временам прихода лучей. (б) — Профили СЗ и восстановленной (точки) ВВ (схематично). (в) — Траектории собственных лучей.

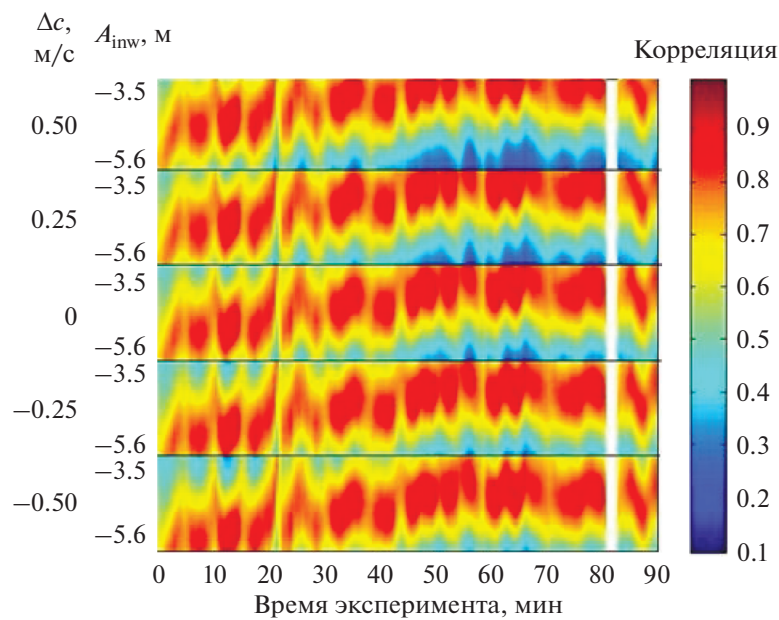


Рис. 6. Функции корреляции между экспериментальными и расчетными импульсами 2.

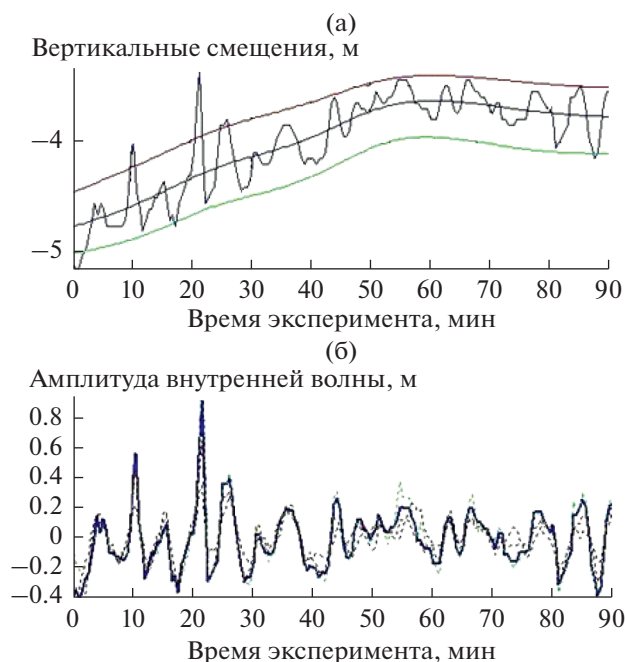


Рис. 7. Зависимости амплитуды ВВ от времени эксперимента.

(увеличение A_{inw}) уменьшает среднее значение скорости звука в водном слое (см рис. 5б).

Однако при этом вариации максимума функции корреляции относительно ее регулярного изменения в ходе эксперимента остаются практически неизменными. Подтверждение этого факта иллюстрируется на рис. 7. Зависимость показана на рис. 7а осциллирующей синей линией, сглаженные линии на этом рисунке отвечают усредненным по 20 минутному интервалу значениям функций $\langle A_{mn}(t_{\text{exp}}) \rangle$ для $\Delta c_n(\text{м/с}) = -0.5$ (зеленая линия), 0 (синяя), 0.5 (красная). На рис. 7б тем же цветом представлены разности $\Delta A_{mn}(t_{\text{exp}}) = A_{mn}(t_{\text{exp}}) - \langle A_{mn}(t_{\text{exp}}) \rangle$, которые весьма близки друг к другу. Практически к такой же зависимости приводит и другой метод восстановления амплитуды ВВ, основанный на схеме линейной лучевой томографии Манка [12] и показанный на рис. 7б черной точечной линией. Именно эту величину $\Delta A_{mn}(t_{\text{exp}})$ можно считать полученной оценкой амплитуды внутренней волны.

Такие же зависимости, как и представленные на рис. 6–7, были получены и для других интервалов времени эксперимента, отмеченных на рис. 3. В результате была восстановлена амплитуда ВВ на всем анализируемом интервале от 0 мин $< t_{\text{exp}} < 270$ мин.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

Восстановленная реализация внутренних волн на отрезке 270 мин и ее частотный спектр показан

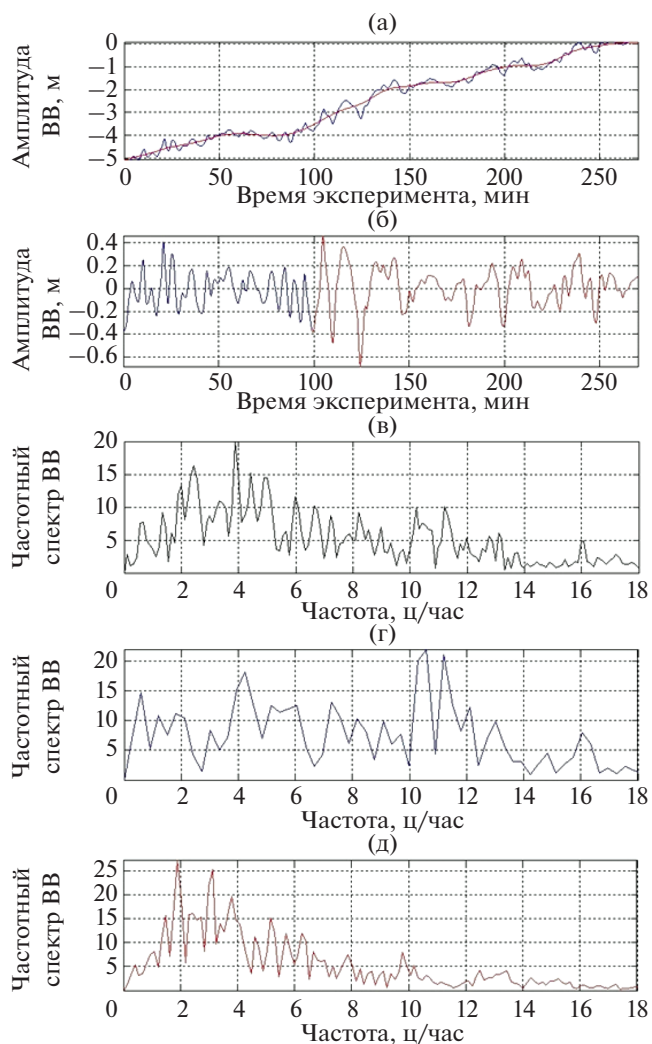


Рис. 8. (а) — Реализация внутренних волн, восстановленная по акустическим данным; (б) — короткопериодные внутренние волны; (в) — частотный спектр внутренних волн, рассчитанный для всего анализируемого времени акустического эксперимента (0–270) мин; (г) — спектр 1-го участка: (0–100) мин (синяя линия на рис. 8б); (д) — спектр 2-го участка: (100–270) мин (красная линия на рис. 8б).

ны на рис. 8. Причем на рис. 8а приведена реализация внутренних волн (синяя линия) вместе с ее усредненной по 20-минутному интервалу версией (сиреневая линия). Их разность показана на рис. 8б. Это запись внутренних волн с убраным трендом. Обращают на себя внимание пики спектра на частотах 2.5 и 4 ц/ч, а также в диапазонах 6–8 и 10–12 ц/ч (рис. 8в). Обратившись к исходной реализации можно заметить, что в первый час наблюдений проходили короткопериодные волны с периодами около 5 мин, а затем вместе с начавшимся постепенным уходом термоклина вверх стали преобладать волны больших периодов (15–20 мин). Высоты волн лежали в пределах

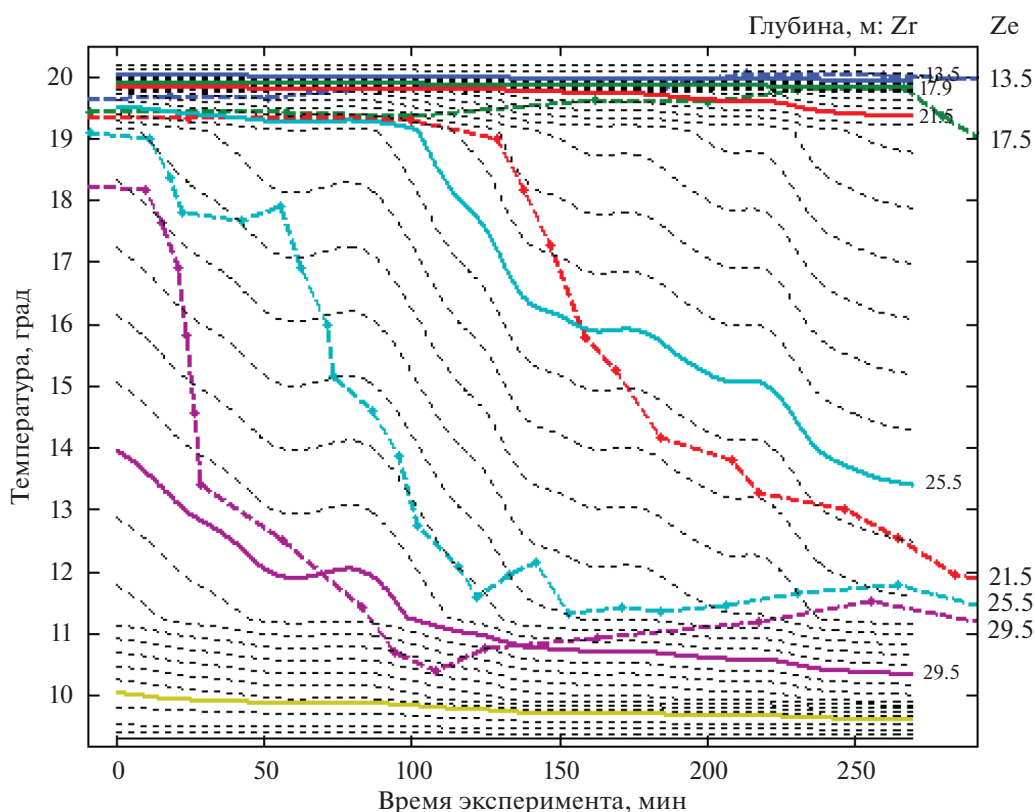


Рис. 9. Изменение температуры воды на различных глубинах в ходе эксперимента: измеренное термисторами — штриховые линии, рассчитанное по восстановленным амплитудам ВВ — сплошные и точечные линии.

от 0.5 до 1 м. Отмеченный тренд термоклина, продолжавшийся 3 ч, составил 4 м.

Полученные данные о внутренних волнах из акустического эксперимента подтверждаются записями термогирлянды. В результате получается следующая картина. Во время акустического эксперимента по шельфу в направлении берега распространялись интенсивные инерционные внутренние волны с периодом около 17 ч, что является характерной чертой для внутриволнового поля Черного моря [13, 14]. Обработанная реализация относилась ко времени прохождения через акваторию эксперимента подошвы инерционной внутренней волны, после чего пошел передний фронт волны. В это время термоклин перемещался из придонного положения вверх. Этим объясняется появление на реализации тренда, а в записях гирлянды этому соответствовало похолодание водной толщи. На рис. 9 штриховыми линиями показан ход температуры на указанных цифрами глубинах Z_e (в м) во время акустического эксперимента (0–270 мин), измеренный заякоренной цепочкой термисторов. Здесь же точечными линиями представлено рассчитанное по восстановленным амплитудам ВВ изменение в ходе эксперимента температуры воды с шагом 0.5 м на глубинах $Z_r = (14–35)$ м. Сплошные цветные линии

соответствуют глубинам термисторов. Можно отметить достаточно хорошее качественное соответствие восстановленных колебаний термоклина с результатами независимых измерений с учетом того, что последние были проведены в более мелководном (34 м) месте на удалении около 1 км от АДС.

На переднем фронте длинной внутренней волны присутствовали короткопериодные внутренние волны. Сначала это были 5-минутные волны небольших амплитуд (до 0.5 м), а затем, по мере укрупнения фронта длинной волны, амплитуды короткопериодных волн возросли до 1 м, а периоды увеличились до 15–20 мин. Возрастание амплитуд короткопериодных внутренних волн, вероятно, было вызвано возникновением сдвиговой неустойчивости течений на переднем фронте инерционной внутренней волны. Необходимо подчеркнуть высокую точность представленного акустического метода измерения внутренних волн: с его помощью удалось надежно зарегистрировать волны таких малых амплитуд, регистрация которых контактными методами бывает затруднительна. Сопоставляя данные, полученные в данном эксперименте, с тем, что известно о внутренних волнах Черного моря, можно сделать выводы, что нами наблюдались помимо внутрен-

них инерционных волн так называемые фоновые внутренние волны высокочастотного диапазона. Вследствие отсутствия в Черном море приливов короткопериодные волны здесь по амплитудам существенно меньше своих аналогов из открытых морей или океана, что было показано в [15]. В то же время другие природные источники генерации, связанные с атмосферным воздействием, могут приводить и приводят к возникновению на черноморском шельфе интенсивных солитоноподобных внутренних волн высотой в несколько метров [16, 17]. Подобные волны даже могут достигать высоты 15 м (это случай зарегистрированных рекордных внутренних волн на Черном море) [8, 9], но для выявления таких случаев надо проводить длительные наблюдения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все характеристики внутренних волн, полученные в акустическом томографическом эксперименте, типичны для внутриволнового поля черноморских шельфов, и они подтверждены одновременными контактными измерениями, осуществленными с помощью термогирлянды. В результате можно сделать вывод о применимости предложенного в данной работе метода акустической томографии мелкого моря для исследований не только течений и структуры скорости звука на шельфе, что было продемонстрировано в работе [3], но также и внутренних волн всех диапазонов (от инерционных до короткопериодных волн).

Обработка результатов эксперимента выполнена в рамках темы госзадания Минобрнауки РФ № FMWE-2021-0010 и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-55-S52005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фурдуев А.В. Акустический мониторинг изменчивости подводной среды (экспериментальная проверка новых методов) // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 3. С. 422–430.
2. Kuryanov B., Serebryany A. Acoustic monitoring of environmental variability induced by storm on shelf of the Black Sea: internal bore observation // 19th International congress on acoustics. ICA 2007 Madrid. Special Issue of the journal Revista de Acustica. 2007. V. 38. № 3–4.
3. Гончаров В.В., Иванов В.Н., Кочетов О.Ю., Курьянов Б.Ф., Серебряный А.Н. Акустическая томография на шельфе Черного моря // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 5. С. 614–622.
4. Goncharov V., Kuryanov B., Serebryany A. Local acoustic tomography on shelf of the Black Sea // Hydroacoustics. 2013. V. 16. P. 67–76.
5. Серебряный А.Н., Химченко Е.Е. Сильная изменчивость скорости звука в шельфовой зоне Черного моря, вызванная инерционными внутренними волнами // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 5. С. 580–590. <https://doi.org/10.1134/S032079191805009X>
6. Серебряный А.Н., Лаврова О.Ю. Антициклонический вихрь на шельфе северо-восточной части Черного моря: совместный анализ космических снимков и данных акустического зондирования толщи моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 2. С. 206–215.
7. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. Изучение гидродинамических процессов в шельфовой зоне на основе спутниковой информации и данных подспутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 98–129.
8. Бондур В.Г., Серебряный А.Н., Замишин В.В., Тарасов Л.Л., Химченко Е.Е. Интенсивные внутренние волны аномальных высот на шельфе Черного моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 119–128.
9. Бондур В.Г., Серебряный А.Н., Замишин В.В. Аномальный цуг внутренних волн рекордных высот на шельфе Черного моря, генерируемый атмосферным фронтом // Доклады Акад. наук. 2018. Т. 483. № 4. С. 431–436.
10. Очеретник В.В., Зацепин А.Г., Куклев С.Б., Баранов В.И., Машура В.В. Примеры подходов к исследованию температурной изменчивости вод шельфа Черного моря при помощи кластера термокос // Океанология. 2020. Т. 60. № 2. С. 173–185.
11. Гончаров В.В. Метод согласованных временных откликов в акустической томографии океана // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 5. С. 622–629.
12. Munk W.U., Vorchester P., Wunsch C. Ocean acoustic tomography // Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1995. 423 p.
13. Химченко Е.Е., Серебряный А.Н. Внутренние волны на кавказском и крымском шельфах Черного моря (по летне-осенним наблюдениям 2011–2016 гг.) // Океанологические исследования. 2018. Т. 46. № 2. С. 69–87. [https://doi.org/10.29006/2587-9634.JOR-2018.46\(2\).7](https://doi.org/10.29006/2587-9634.JOR-2018.46(2).7)
14. Serebryany A., Khimchenko E., Popov O., Denisov D., Kenigsberger G. Internal Waves Study on a Narrow Steep Shelf of the Black Sea Using the Spatial Antenna of Line Temperature Sensors // J. Marine Science and Engineering. 2020. V. 8. P. 833. <https://doi.org/10.3390/jmse8110833>
15. Иванов В.А., Серебряный А.Н. Частотные спектры короткопериодных внутренних волн в бесприливном море // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 18. № 6. С. 683–685.
16. Иванов В.А., Серебряный А.Н. Внутренние волны на мелководном шельфе бесприливногo моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19. № 6. С. 661–665.
17. Иванов В.А., Серебряный А.Н. Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне бесприливногo моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. № 6. С. 648–656.