УДК 534.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ

И.О. Ярощук, А.П. Леонтьев, А.В. Кошелева, А.Н. Самченко, А.А. Пивоваров, Ф.Ф. Храпченков, А.Н. Швырев, Е.И. Ярощук Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН¹

На основании обработки экспериментальных данных, полученных осенью 2011 г., анализируются динамические характеристики внутренних волн (ВВ). Показана временная перемежаемость внутреннего волнения, когда на фоне низкочастотных колебаний появляются интенсивные высокочастотные волны. Определено направление, в котором переносится энергия этих волн. Показано, что интенсивность ВВ периодически изменяется во времени и связана с циклами баротропного прилива.

введение

Исследование внутренних гравитационных волн в океане на протяжении уже нескольких десятков лет является одним из центральных направлений в океанологии. На шельфе океана роль ВВ особенно велика. В прибрежных районах морей ВВ играют важную, а порой и основную роль в процессах, обусловливающих горизонтальный и вертикальный обмен водных масс. Несомненно и практическое значение ВВ для гидроакустики. Они являются ведущим фактором в процессе формирования пространственно-временного распределения поля скорости звука. Короткопериодные ВВ отвечают за флуктуации скорости звука, соответственно они определяют и флуктуации звуковых волн [1]. Стоит отметить,

что эти флуктуации в прибрежных зонах морей значительно интенсивней флуктуаций в глубоком океане [2].

Принято считать, что основным источником, генерирующим ВВ в шельфовой зоне, является взаимодействие течений баротропного прилива с подводными хребтами и (или) с континентальным склоном в мористой части шельфа [3, 4]. При этом основной энергонесущей частотой внутреннего прилива является компонента, соответствующая баротропному приливу М2 (полусуточный прилив) [5]. Топография дна залива Посьета не обладает достаточной пространственной изменчивостью для того, чтобы генерировать заметное внутреннее волнение [6]. Поэтому в ис-

¹ 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43; e-mail: kosheleva@poi.dvo.ru

следуемом районе генерация внутренних волн происходит исключительно за счет взаимодействия течений баротропного прилива с материковым склоном. Для сравнения отметим. что в выбранной нами части шельфа глубины составляют 40-100 м, а в районе свала глубин они быстро достигают значений 3000 м. Приливные течения, встречая на своем пути это препятствие, приобретают вертикальные составляющие. Вертикальные составляющие приливных течений вызывают периодические вертикальные смещения изопикнических поверхностей и тем самым генерируют BB. Внутренняя волна, двигаясь по направлению к берегу, может испытывать существенную трансформацию и порождать квазилинейные и нелинейные волны (боры и солитоны). При определенных гидрологических условиях эти трансформации представляют собой так называемые интенсивные короткопериодные внутренние волны, которые получили такое название из-за довольно больших амплитуд [7]. Стоит отметить, что появление таких интенсивных цугов короткопериодных волн в большей степени относится к специфике шельфа. В глубоком океане, как правило, поле ВВ является суммой гармонических составляющих. Интенсивные цуги короткопериодных ВВ обладают значительной пространственно-временной перемежаемостью. Такие волны вызывают особенно большие и быстрые (временной масштаб – несколько минут) изменения гидрологических характеристик, а значит, и вариаций поля скорости звука, и соответственно они приводят к значительным флуктуациям акустических сигналов. Кроме того, они являются основным звеном передачи энергии от приливов к турбулентному перемешиванию. Пожалуй, это две основные причины, по которым исследование таких волн актуально как для классической океанологии, так и для гидроакустики.

Поэтому основной целью настоящей работы являлось проведение натурных исследований и количественное оценивание характеристик короткопериодных BB, возникающих на шельфе в северо-западной части Японского моря после каждого полусуточного приливного цикла. Однако понимание этой проблемы не представлялось возможным без попутного исследования и всех других фоновых типов BB.

Прежде чем перейти к обсуждению экспериментов, стоит сделать небольшой экскурс в историю и напомнить, что внутреннее волнение шельфовой зоны Японского моря изучалось целым рядом отечественных авторов. Пожалуй, с некоторой долей условности все публикации можно разбить на три группы. Первая, количественно наибольшая часть таких работ, посвящена океанологическим инструментальным измерениям, в процессе обработки которых анализировались процессы распространения и проблемы генерации ВВ на кромке свала глубин. Типичными публикациями такого плана можно назвать статьи авторов [8-10]. В этих статьях представлены исследования, выполненные на базе распределенных датчиков температуры (РДТ), которые либо использовались стационарно [8], либо буксировались [10]. В работах авторов [9, 10], кроме того, был выполнен большой объем гидрологических разрезов. Вторая часть работ посвящена нелинейным и статистическим эффектам распро-

странения волн, например, [11, 12]. При этом центр тяжести представленных результатов в большей степени приходится на теоретические исследования. И последний цикл работ – это экспериментальное изучение ВВ акустическими методами, например, [13]. Здесь проанализированы общие закономерности вариаций, в том числе звукового случайных, поля на фоне ВВ. В ракурсе данной классификации настоящая работа относится к первой из упомянутых выше групп. Отличие данной статьи от работ других авторов заключается в комплексном подходе к экспериментальным исследованиям ВВ. Прежде всего, для стационарных непрерывных наблюдений поля температуры использовались не РДТ, а термогирлянды, созданные на современной элементной базе [14]. Такой подход, несомненно, более эффективен по целому ряду причин. Например, в настоящей работе он позволил выделять и обрабатывать отдельные изотермы (что и соответствует ВВ).

Методика проведения эксперимента

Экспериментальные работы были проведены в период с 11 по 20 октября 2011 г. Географическое положение района показано на рис. 1. Для исследования динамических характеристик ВВ проводились достаточно длительные измерения колебаний гидрологических элементов на трехмерной системе точек. Как известно, минимальная измерительная система – это треугольник. Основным инструментом для исследований BB являлись термогирлянды, у которых цифровые датчики температуры располагались через 3 м по глу-



Puc. 2. Распределение температуры по глубине по данным термогирлянды 5

за период 12-20 октября 2011 г.

бине, дискретность регистрации составляла 10 секунд [14]. Глубина места в данном районе – немногим более 40 м, а расстояние между заякоренными автономными системами - по 100 м и 1000 м, таким образом, что они образуют малый и большой треугольники.

Во время проведения экспериментов проводился целый цикл дополнительных измерений, таких как фоновые съемки и гидрологические разрезы [15]. Для более детального анализа динамики вод в период 12-13 октября проводились суточные наблюдения с борта заякоренного судна (рис. 1). В рамках суточного эксперимента через каждые 15 минут выполнялось зондирование толщи воды гидрологическим CTD зондом RBR XR-620. После каждой фазы прилива проводились «частые» (с интервалом 2 минуты) зондирования в течение 100 минут. В километре от судна на дне был установлен акустический профилограф течения ADP Argonaut 750 kHz.

термо-

Синоптические условия с 11 по 15 октября характеризовались достаточной стабильностью: ветер был слабый и лишь временами усиливался до умеренного южных направлений, волнение морской акватории было слабое. На рис. 2 по данным термогирлянды с номером 5 показано распределение температуры по глубине водного слоя в этот период. На поверхности вода была прогрета до 14°С, а вблизи дна температура падала до 3°С. В течение суток термоклин дважды менял свое положение по глубине почти на 10 м, он располагался от горизонта 7 м до 20 м и от 17 м до



Рис. 3. Распределение температуры по глубине по результатам CTDзондирований на суточной станции с дискретностью 15 минут

30 м. На рис. З показано распределение температуры по результатам зондирований на суточной станции, выполненных с интервалом 15 минут. Частота плавучести, усредненная за 2 часа, достигала значений до 25 циклов/час, а сам ее профиль изменял свое положение по глубине в соответствии с циклами приливов (рис. 4). 16 октября в первой половине суток ветер резко усилился и 16-17 числа оставался сильным (до 20 м/с) северного и северо-западного направления. Квазистационарный и сильный ветровой поток вдоль береговой черты привел к мощному апвеллингу, когда теплые воды залива были полностью замещены холодными глубинными водами океана. Как видно из рис. 2, температура воды на поверхности к 18 октября упала до 5°С. Термоклин исчез, и весь слой воды стал холодным и квазиоднородным.

Анализ данных наблюдений

Как было выше отмечено, гидрологические условия в процессе проведения эксперимента существенно различа-

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ПОДВОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



Рис. 4. Частота плавучести, полученная по данным зондирований и усредненная по интервалам 2 часа для графиков 1–4 (интервалы показаны на рис. 5). Графики 5, 6 соответствуют частоте плавучести, усредненной по разрезам от м. Шульца до о-ва Фуругельма за 18 и 20 октября



Рис. 5. Изотерма 8°С за двое суток по данным системы 5 (а); высокочастотная и низкочастотная части (фильтр низких частот – 1 час) изотермы (б); баротропный прилив (в), отмечены временные интервалы, по которым вычислялась частота плавучести

лись в период 11–15 октября и 16–20 октября. Апвеллинг и как следствие его – исчезновение выраженного пикноклина во второй фазе эксперимента (на рис. 4 показано распределение частоты плавучести 18 и 20 октября, графики 5 и 6)

40 ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2013. № 1(15)

стали причиной слабо выраженного внутреннего волнения, поэтому далее, в контексте изучения ВВ, нас будет интересовать только первая фаза эксперимента.

Представление об изменчивости характеристик среды в ходе приливного цикла можно получить по данным специальных расчетных программ баротропного прилива, колебаниям изотерм и изменчивости течений. Для примера такие данные за двое суток приведены в нижней части рис. 5.

Наблюдения в первой фазе эксперимента на базе термогирлянд и СТД-зондирований позволили детально проследить длиннопериодные внутренние колебания. Обычно они проявляются в поднятиях и опусканиях термоклина с периодом, близким к полусуточному М2 (рис. 3). Этот процесс очевиден и следует из физики явления: полная вода в придонной области характеризуется затоком холодных вод, а в области термоклина - поднятием последнего к поверхности. Наиболее удобно отслеживать движение термоклина по перемещению изотермы 8°С, которая находилась в середине термоклина. Как видно из рис. 5 (по данным термогирлянды № 5), эта изотерма совершала колебания во времени от глубины 11 м до 24 м. Среднее ее положение в пространстве – это глубина 17,5 м. Таким образом, термоклин большую часть времени находился в верхнем положении, и его движение имеет несинусоидальную форму. Он может совершать локальные заглубления и всплытия как выше, так и ниже среднего уровня. Качественно эту картину можно наблюдать и по густоте графиков на рис. 3. Стоит отметить, что эти наблюдения заметно отличаются от результатов работы

[8], где автор описывает длительные, до нескольких часов, заглубления термоклина.

Для изучения распределения энергии в широком диапазоне частот по реализациям температуры были рассчитаны функции спектральной плотности. По данным термогирлянды № 5 была выбрана реализация длиной 4 суток изотермы 8°С. Спектр мощности расчитывался за одни сутки с перекрытием на половине реализации и с последующим усреднением. На рис. 6 представлен спектр мощности колебания этой изологарифмическом термы в масштабе по обеим осям координат. Наклонной линией показана степенная зависимость $\omega^{-3/2}$, которая наилучшим образом, по результатам метода наименьших квадратов, описывает результаты обработки. Ради удобства просмотра иллюстрации эта линия несколько смещена книзу. Из приведенного графика прежде всего можно отметить несколько «размазанный» пик на частоте полусуточного прилива М2, который отмечают многие исследователи. Как известно, в окрестности полусуточного прилива могут наблюдаться всплески приливных волн S2 [16]. Однако из-за недостаточной длительности реализации температуры разделить их в процессе обработки не удалось. Во всем приведенном диапазоне частот спектр мощности удовлетворительно описывается степенной зависимостью $\omega^{-3/2}$, что отличается от известной зависимости ω⁻², следующей из модели Гаретта-Манка, описывающей «волновой континуум» в глубоком океане [17]. Однако если подбирать степенную зависимость по полученным данным только в области высоких частот (ω > 1 цикл/час), то показатель степени уменьшается практически до -2.

Из приведенных на рис. 5 результатов (верхняя часть рисунка) хорошо видно, что помимо среднего полусуточного вертикального хода термоклина на нем присутствуют интенсивные короткопериодные колебания. Обычно такие, ограниченные во времени, колебания (цуги) возникали через 1-2 часа после пика прилива, а длительность их составляла несколько часов. Высота волн в цугах в среднем составляла 5 м, а на отдельных отрезках достигала значений 12 м. Достаточно высокая когерентность цугов на термогирляндах 2, 5, 6 позволила получить скорость и направленность их движения. В течение нескольких суток скорость их движения варьировалась от 0,2 м/с до 0,6 м/с. На рис. 7 приведена угловая гистограмма направлений движения волновых пакетов (слева) и скорость их движения (справа). Среднее направление движения цугов составляет примерно 330° (север-северо-запад), что свидетельствует в пользу гипотезы о зарождении интенсивных ВВ в районе свала глубин. Здесь стоит отметить, что все другие внутренние колебания вне цугов, кроме отдельных уединенных волн, обладали крайне низкой когерентностью даже на малых масштабах (100 м), поэтому



Рис. 6. Спектр мощности колебаний изотермы 8°С

сделать какие-то заключения об их скорости движения и направленности не представилось возможным.

В состав зарегистрированных цугов входило от трех до десяти волн. Периоды колебаний, как следует из рис. 8, составляли от 5 до 60 минут (красные графики). Соответственно длины волн составляют 120-1400 м. Основная энергия сконцентрирована в диапзоне частот, соответствующих периодам 12–20 минут (5–3 циклов/ час). Энергия цугов интенсивных ВВ достаточно велика по сравнению с другими высокочастотными ВВ, когда цуги отсутствуют (синие графики на рис. 8). Она также вносит заметный вклад и в распределение энергии ВВ по частотам за суточный цикл. На рис. 6 в области частот 1-12 циклов/час заметен существенный (в диапазоне 3-5 циклов/час – 10 дБ) подъем спектральной кривой.

В заливе Посьета отсутствуют какие-либо стационарные





Рис. 8. Спектр мощности колебаний изотермы. Цвета и последовательность графиков соответствует рис. 5



Рис. 9. Горизонтальная составляющая скорости течения на суточной станции. Верх – север, низ – юг



Рис. 10. Вертикальная (зеленый цвет) и горизонтальная (черный цвет) составляющие скорости течения

течения. Динамика вод залива определяется в основном приливными движениями и сгонно-нагонными ветровыми процессами. Проходящие ВВ вызывают значительное изменение структуры воды. Даже не испытывая обрушения, ВВ приводят к значительной интенсификации перемешивания, поэтому влияние внутреннего волнения может быть определяющим для процессов вертикального обмена. Мы не будем здесь приводить оценки интенсивности турбулентного перемешивания на основе данных, полученных измерителем течений [18], а приведем лишь иллюстрацию, демонстрирующую процесс водообмена. На рис. 9 и 10 приведены результаты измерения течений на суточной станции для 10 горизонтов. Если сравнить временные интервалы на этих рисунках с интервалами на рис. 5, то можно увидеть, что проходящие цуги порождают заметное поле нерегулярных течений. В горизонтальной плоскости направленность течений - север, северо-запад, и изменения наблюдаются в диапазоне 0,2-0,6 м/с. В вертикальной плоскости течения находятся в диапазоне 0,5-2 м/с. Как хорошо известно, во ВВ частички жидкости движутся по эллиптическим орбитам, которые, в свою очередь, перемещаются в направлении движения волн (рис. 7). Поэтому с большой степенью уверенности можно полагать, что данное поле течений является проявлением именно внутреннего волнения.

В заключение анализа экспериментальных данных сделаем несколько замечаний относительно проявления нелинейности во ВВ. Как известно, из-за довольно больших (по сравнению с вертикальными масштабами стратификации) амплитуд линеаризованные уравнения геофизической гидродинамики не вполне адекватно описывают ВВ. И довольно часто в реальных условиях внутреннее волнение может быть как квазилинейным, так сушественно нелинейным и [19]. Присутствие эффектов нелинейности в волновом движении в той или иной степени имело место во всех временных записях вариаций температуры. Если еще раз обратиться к той части рис. 5, где показана низкочастотная составляющая зависимости заглубления изотермы от времени, то можно обратить внимание на не совсем правильный, по сравнению с баротропным приливом, ход графика. Ему присущи изломы различной крутизны. Истинное значение изломов хорошо видно из верхней, исходной временной записи. Такое поведение обычно связано с явлением внутреннего приливного бора, т.е. это длинная ВВ, испытывающая нелинейные искажения по мере движения по шельфу. Характерный признак бора – это достаточно крутой передний фронт. Прохождение этой нелинейной волны обычно вызывает изменение толщины верхнего перемешанного слоя и толщины термоклина. Кроме длинных нелинейных волн в записях часто наблюдались и уединенные волны, которые обычно называют солитонами. На рис. 5 можно заметить такой солитон довольно большой амплитуды - до 8 метров и длительностью около 20 минут. Он характеризовался высокой степенью когерентности на термогирляндах, что сделало возможным определение его скорости движения (0,4 м/с) и направления его движения (примерно 330°). Таким образом, он, как и все другие зарегистрированные солитоны, двигался со стороны свала глубин. На рис. 11 показана детальная структура этой уединенной волны. Из рисунка видно, что как до его прохождения через системы, так и после этого ему сопутствуют более мелкие нелинейные структуры (предвестники). Такое поведение довольно обычное и хорошо описано в литературе. Пространственная длина этой нелинейной структуры около 500 метров.

выводы

На основании проведенного анализа особенностей внутреннего волнения в заливе Посьета можно сделать следующие выводы.

Для шельфовой зоны приливного моря характерно активное и мощное по энергетике внутреннее волнение в достаточно широком диапазоне частот. Определяющим фактором для формирования этого движения является полусуточный приливной цикл. Приливное течение из открытой части моря, набегая на крутой подъем дна, совершает гидродинамический скачок и порождает BB.

Частотный энергетический спектр ВВ превышает уровни, следующие из общепризнанных моделей Гарретта-Манка для глубокого океана. Высокие энергетические уровни наблюдаются на частоте полусуточного прилива и в области интенсивных короткопериодных ВВ.

Детально исследованы интенсивные короткопериодные ВВ. Установлено, что цуги этих волн появляются циклически после пика полусуточного прилива. Они движутся к берегу в



Рис. 11. Детальная структура солитона

среднем по направлению, перпендикулярному изобате резкого свала глубин.

Во всем исследуемом диапазоне частот отмечена нелинейность ВВ. В длинноволновом диапазоне регулярно наблюдаются длинные нелинейные ВВ (боры), а в мелкомасштабной его части – уединенные волны (солитоны). Интенсивные короткопериодные ВВ проявляли скорее квазилинейный, нежели явно выраженный нелинейный характер. Качественно это заключение можно было сделать как из наглядного изучения цугов, так и на основе методов спектрального анализа. Их передние фронты не претерпевали существенных изломов при движении от системы к системе, а анализ спектрального состава указывал на поведение, характерное для слабо затухающей группы гармоник.

В заключение стоит отметить, что хотя приведенные в статье результаты основаны лишь на данных за октябрь 2011 г., но в основу выполненного здесь анализа и сформулированных выводов легли также и аккумулированные экспериментальные результаты, полученные авторами за несколько лет и в различные сезоны года [15, 20].

ЛИТЕРАТУРА

1. Распространение звука во флуктуирующем океане / под ред. С. Флатте М.: Мир, 1982. 336 с.

2. Кацнельсон Б. Г., Петников В. Г. Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 191 с.

3. Baines P.G. On internal tide generation models // Deep-Sea Research. 1982. Vol. 29, No. 3A. P. 307-338.

4. Jezequel N., Maze R., Pichon A. Interaction of semidiurnal tide with a continental slope in a continuously stratified ocean // Deep-Sea Research I. 2002. Vol. 49, No. 4. P. 707–734.

5. Morozov E.G. Semidiurnal internal wave global field // Deep-Sea Research I. Vol. 42, No. 1. P. 135-148.

6. Коротченко Р.А., Самченко А.Н., Ярощук И.О. Применение статистических методов в изучении рельефа шельфовой зоны залива Посьета (Японское море) // Вестник ДВО РАН. 2011. № 6. С. 54–59.

7. Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. «Горячие точки» в поле внутренних волн в океане // Акуст. журн. 2007. Т. 53, № 3. С. 410-436.

8. Серебряный А.Н. Внутренние волны в прибрежной зоне приливного моря // Океанология. 1985. Т. 25. № 5. С. 744-751.

9. Ильичев В.И., Навроцкий В.В. Генерация внутренних волн и вертикальная структура температуры вблизи границы шельфа // ДАН СССР. 1987. Т. 294, № 1. С. 216–220.

10. Navrotsky V.V., Lozovatsky I.D., Pavlova E.P., Fernando H.J.S. Observations of internal waves and thermocline splitting near a shelf break of the Sea of Japan (East Sea) // Continental Shelf Research. 2004. Vol. 24. No. 12. P. 1375–1395.

11. Новотрясов В.В., Карнаухов А.С. О нелинейном взаимодействии внутренних волн в прибрежной зоне Японского моря // Изв. РАН. ФАО. 2009. Т. 45, № 2. С. 276–285.

12. Новотрясов В.В., Ярощук И.О. О распространении длинных нелинейных внутренних волн на фоне статистических неоднородностей поля плотности // Изв. РАН. ФАО. Т. 47, № 5. С. 701–704.

13. Рутенко А.Н. Влияние внутренних волн на распространение звука в шельфовой зоне Японского моря в разные сезоны года // Акуст. журн. 2005. Т. 51, № 4. С. 527–535.

14. Леонтьев А. П., Пивоваров А. А. Автономный цифровой комплекс измерения распределенной температуры // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 3. С. 162–163.

15. Самченко А. Н., Пивоваров А.А., Кошелева А.В. результаты гидрологических и геолого-геофизических исследований залива Посьета // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 1(11). С. 64–68.

16. Морозов Е.Г. Океанские внутренние волны. М.: Наука, 1985. 152 с.

17. Garrett C., Munk W.H. Space-time scales of internal waves: A progressive report // J. Geophysical Research. 1975. Vol. 80, No. 3. P. 291–298.

18. Grin M., Simpson J., Legg S., Palmer M. Internal waves, baroclinic energy fluxes and mixing at European shelf edge // Continental Shelf Research. 2008. Vol. 28, No. 7. P. 937–950.

19. Серебряный А.Н. Эффекты нелинейности во внутренних волнах на шельфе // Изв. РАН. ФАО. 1990. Т. 26, № 3. С. 285–293.

20. Долгих Г.И., Лучин В.А., Ярощук И.О. и др. Исследования пространственно-временных вариаций поля скорости звука в заливе Посьета // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. М.: ГЕОС, 2008. С. 412-434.

