

УДК 551.466.8

МНОГООБРАЗИЕ ТРАНСФОРМАЦИЙ НЕЛИНЕЙНЫХ ВНУТРЕННИХ ПРИЛИВНЫХ ВОЛН НА СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ ШЕЛЬФЕ АВСТРАЛИИ

© 2023 г. **П. Е. Холловей**¹, **А. Н. Серебряный**^{2,3,*}

Представлено академиком РАН Р.И. Нигматулиным 10.10.2022 г.

Поступило 10.10.2022 г.

После доработки 15.11.2022 г.

Принято к публикации 21.11.2022 г.

Интенсивные нелинейные внутренние волны на материковой окраине на северо-западном шельфе Австралии обсуждаются с использованием подробных временных рядов скорости и температуры, зарегистрированных на заякоренных измерителях течений и температуры в течение 67 сут. В регионе наблюдается интенсивный полусуточный внутренний прилив, который распространяется к берегу по шельфу. Наблюдаются усиление внутреннего прилива и формирование боро-подобных образований, часто сопровождаемых внутренними уединенными волнами. Представлен частотный спектр внутренних волн, рассчитанный по записям компоненты течений, направленной по нормали к берегу. В данной работе акцент сделан на анализе формы и свойств внутреннего прилива. Выделено пять различных типов волн, которые состоят из боров на передней или задней стороне волны, “прямоугольных” форм волн с бором одновременно на обеих сторонах волны (как на передней, так и на задней), а также линейных волн малой и большой амплитуды. Приведена статистика трансформаций типов внутренних приливов при их распространении по участку трассы от склона до шельфа. Выявлены основные типы волн, проходящие без трансформации, и волны, имеющие относительно короткое время жизни, к которым относятся “прямоугольные” приливные волны и волны с борами на заднем склоне волны. В целом анализ показал реальную картину происходящих нелинейных трансформаций приливных внутренних волн, происходящих на СЗ-шельфе Австралии.

Ключевые слова: северо-западный шельф Австралии, внутренний прилив, солитоны, течения

DOI: 10.31857/S2686739722602216, **EDN:** TIJHJN

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивные полусуточные внутренние приливы хорошо известны на северо-западном шельфе Австралии [1–3], а также во многих других районах океана [4]: шельфе Новой Англии [5], Южно-Китайского моря [6] и других местах. Волны, генерируемые над склоновой областью, на северо-западном шельфе Австралии распространяются в сторону берега и быстро рассеиваются в районе излома шельфа [7]. Наблюдается, что в связи с нелинейной трансформацией длинный

внутренний прилив становится круче, образуя внутренний бор и пакеты коротких солитоноподобных внутренних волн [8–10]. Однако ранее опубликованные данные дали лишь ограниченную информацию о характере наблюдаемых волн.

Работа готовилась к публикации, но внезапно произошло трагическое событие – Питер Холловей ушел из жизни и материалы остались неопубликованными. Тема нелинейных внутренних волн на шельфе остается в центре внимания океанологов, и результаты статьи востребованы специалистами. Представленные в статье результаты обеспечены более совершенными измерениями, что позволило иметь временные ряды свойств внутренних волн с высоким временным и пространственным разрешением из области перехода от материкового склона в шельфовую зону. Данные предоставляют подробную информацию о форме внутренней волны и о том, как форма изменяется по мере распространения волн, а также о формировании внутренних уединенных волн из внутренних боров.

¹Школа географии и океанографии,
Университетский колледж,
Университет Южного Нового Уэльса, Академия
вооруженных сил Австралии, Канберра,
АКТ 2600, Австралия

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской академии наук, Москва, Россия

³АО “Акустический институт
им. акад. Н.Н. Андреева”, Москва, Россия

*E-mail: serebryany@hotmail.com

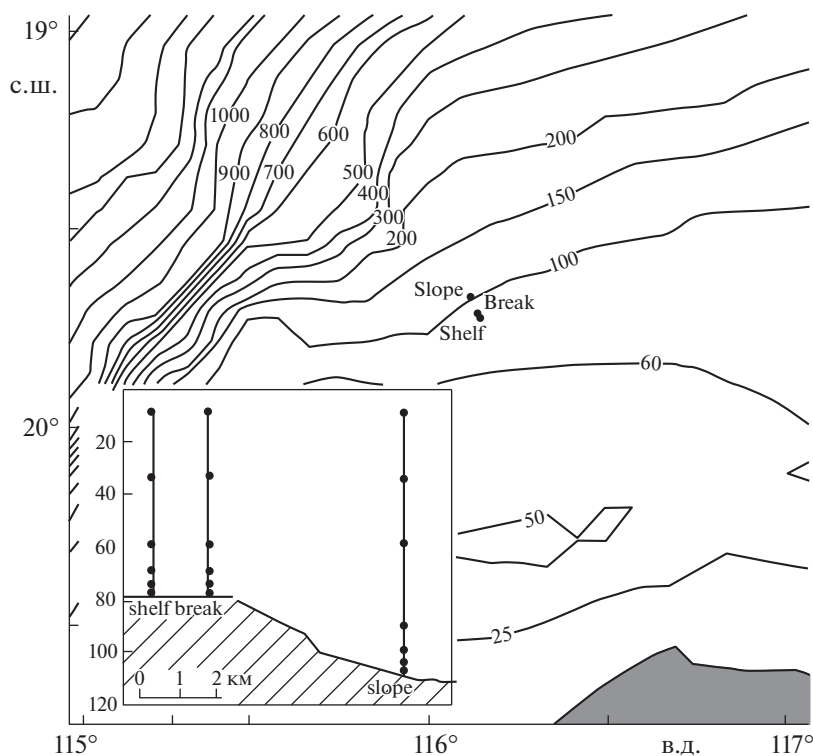


Рис. 1. Карта северо-западного шельфа Австралии с указаниями мест заякоренных станций Slope, Break и Shelf. Во врезке слева внизу показаны положение заякоренных станций и расположение измерителей течений.

НАБЛЮДЕНИЯ

Три заякоренные станции, содержащие в общей сложности 19 измерителей течений, были установлены в линию, ориентированную перпендикулярно изолиниям батиметрии на СЗ-шельфе Австралии. Заякоренные станции “slope” и “break” были расположены на расстоянии 5070 м, а “break” и “shelf” — на расстоянии 1500 м. Наиболее удаленная от берега станция “slope” находилась в точке с глубиной 110 м, а “break” и “shelf” на глубинах около 80 м (см. рис. 1). В основном использовались акустические измерители течений Steedman, которые измеряли 2-минутные средние значения вектора. Дополнительно использовались измерители течений Inter Ocean “S4” с дискретностью измерений 1 мин и усреднением 6 мин. Измерения проводились в течение 67 сут с 9 февраля по 24 апреля 1992 г. с 2-дневным перерывом с 14 по 16 марта, когда приборы извлекались, обслуживались и передислоцировались.

Одной из целей программы измерений было исследование взаимодействия внутренних волновых течений с придонным пограничным слоем океана (см. [11]). По этой причине у морского дна сконцентрированы вертушки с приборами на высоте 2.5, 5.0, 10.0 и 20.0 м над дном, а также приборы выше в толще воды. Благодаря высокой частоте дискретизации, хорошему вертикальному

разрешению и близкому расположению заякоренных станций данные хорошо подходят для детализации свойств нелинейных внутренних волн и наблюдения за трансформацией волн по мере их распространения.

Построение временных рядов текущих компонентов течений или температуры показывает огромное разнообразие колебаний с периодами от полусуточных приливов до короткопериодных колебаний с периодами около 10 мин. Формы волн также сильно различаются. Во-первых, делается попытка классифицировать наблюдения по ряду различных типов волновых форм. Вертикальное распределение амплитуды внутренней волны с точки зрения течения и вертикального смещения подчиняется модальной функции. Поэтому для исследования формы волны целесообразно рассматривать наблюдения только с одного уровня. Наблюдается, что волны распространяются в направлении берега, и в среднем фронты волн приблизительно выровнены параллельно батиметрическим изолиниям. Следовательно, составляющая течения в направлении от берега/на берег (берег определяется как 158° к востоку от севера, соответствующая линии, проходящей через 3 заякоренной станции) считается репрезентативной для формы волны и наблюдений от 3 станций на высоте 10 м над уровнем моря.

ЧАСТОТНЫЙ СПЕКТР ВНУТРЕННИХ ВОЛН

Для проведения анализа рядов течений и расчета частотного спектра были выбраны показатели измерителя на горизонте 20 м над дном в точке “slope” и направлении перпендикулярном береговой черте. Сначала из общего сигнала была удалена баротропная составляющая прилива. Это делалось удалением усредненного по глубине значения течения. В результате был получен ряд показателей бароклинного течения. По полученному ряду составляющей течения, направленной по нормали к береговой черте, был рассчитан частотный спектр, представленный на рис. 2. На спадающем спектре заметно выделяется наибольший пик M_2 , связанный с приливными правильными полусуточными волнами. Еще присутствует пик на частоте, близкой к локальной инерционной частоте f . В высокочастотном диапазоне выделяется пик N на частотах, близких к 3 ц/ч, связанный с интенсивными солитоноподобными волнами.

КЛАССИФИКАЦИЯ ВОЛНОВЫХ ФОРМ

В общей сложности учитываются 130 полусуточных колебаний по записям течений и по вертикальным смещениям, вычисленным по временным рядам температуры. Стало очевидным, что эти 130 волн можно разделить на ряд различных волновых форм, и было определено 5 различных типов. В этом подходе рассматривается только форма полусуточных колебаний, и наличие или отсутствие короткопериодных внутренних уединенных (солитоноподобных) волн не влияет на классификацию. На рис. 3 показаны 5 выделенных волновых форм вместе с примером каждого типа из текущих наблюдений. Дано краткое описание каждого вида. Количество появлений каждой формы волны на каждой из 3 станций показано в виде гистограммы на рис. 3 справа.

Форма волны типа 1 представляет собой бор на переднем склоне волны, наложенную на приблизительно устойчивый фоновый поток, часто связанный с одиночными волнами большой амплитуды. Тип 2 — с бором на задней поверхности волны. Тип 3 представляет собой одновременное присутствие боров как на передней, так и на задней стороне волны, этот тип мы называем “прямоугольной” (square) волной. Все эти формы сигналов сильно нелинейны, тогда как тип 4 представляет собой колебание малой амплитуды, приблизительно синусоидальное, хотя этот сигнал часто содержит многочисленные высокочастотные колебания. Тип 5 — синусоидальная волна большой амплитуды без признаков нелинейных искажений.

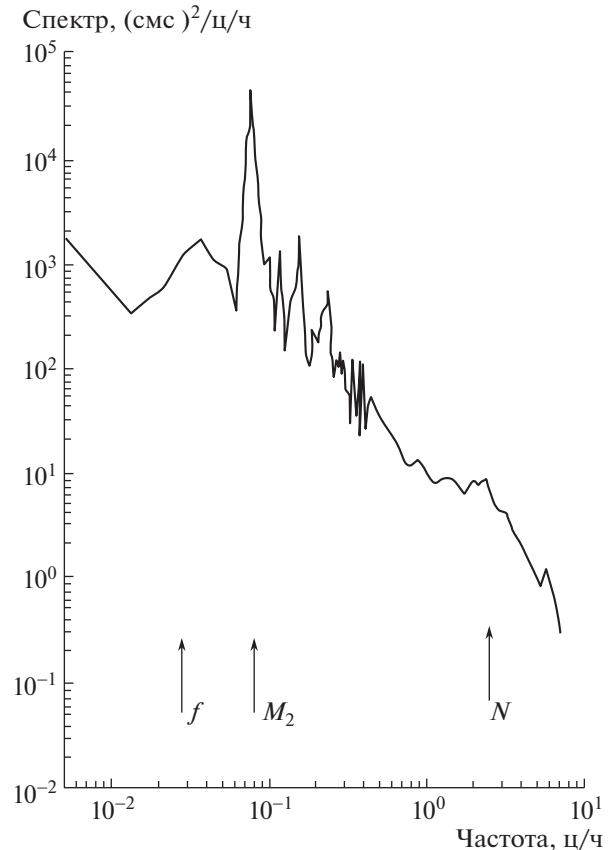


Рис. 2. Спектр внутренних волн, рассчитанный по данным горизонтальной компоненты течений нормальной к береговой черте за весь период наблюдений.

Волны с бором на заднем склоне больше встречаются в глубокой точке “slope”, их количество уменьшается при смещении на шельф. Немного меньше случаев появлений прямоугольных типов волновых форм (тип 3). Их количество увеличивается при смещении от “slope” на мелководные станции. Число синусоидальных волн малых амплитуд во многом превосходит число синусоидальных волн с большими амплитудами. Их число сопоставимо с волной типа 1, без изменения проходящей через все 3 станции. Следует отметить, что типы волн 1 и 4 — наиболее часто регистрируемые в наблюдении.

“Прямоугольные” волны типа 3 менее распространены, но наблюдается неуклонное увеличение числа этих волн при перемещении на более мелководные станции, т.е. от “slope” к “shelf”. В то же время наблюдается устойчивое снижение количества волн с бором на тыльной стороне волны (тип 2) при их смещении на мелководье от “slope” к “shelf”. Обращает на себя внимание, что сильно нелинейные формы волны (типы от 1 до 3) значительно более распространены на всех

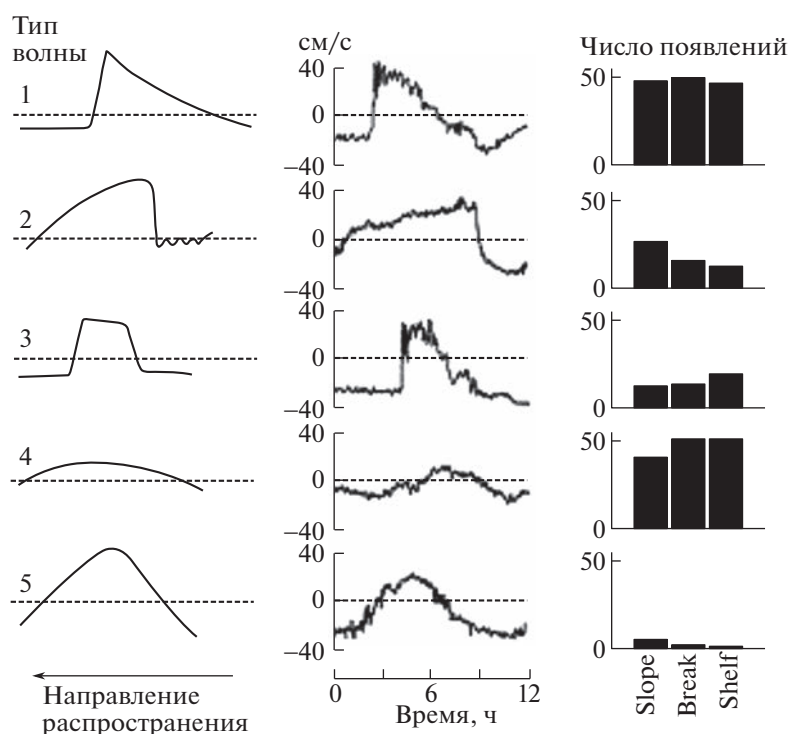


Рис. 3. Пять основных характерных форм волн, наблюдаемых на заякоренных станциях. Левая колонка — на ней представлены типы волн в виде схематичных рисунков. Средняя колонка — примеры реальных волн соответствующего типа (записи компоненты течения нормального к берегу). Колонка справа — распределение типов волн на трех заякоренных станциях (в виде гистограмм).

станциях, чем синусоидальные формы волн (типы 4 и 5).

ВОЛНОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В этом разделе рассматривается изменение или трансформация формы волны между станциями. При рассмотрении наблюдений с трех станций возможно большое количество комбинаций преобразования формы волны, и была составлена статистика по этим различным преобразованиям.

На рис. 4 представлена статистика возникновения основных волн-преобразований в виде гистограмм, куда включены все преобразования, происходящие более двух раз. Часто можно увидеть, что наиболее распространенная форма волны с бором на переднем склоне волны — проходит через заякоренные станции без изменения формы волны. Следующим наиболее распространенным преобразованием является волна малой амплитуды, формирующая бор на переднем склоне, а затем волна большой амплитуды, образующая бор на переднем склоне. Другие комбинации встречаются с приблизительно аналогичными частотами.

Основные особенности заключаются в следующем. Наиболее распространенной формой волны является бор на переднем склоне волны (тип 1), и чаще всего эта форма волны не меняется между

3 точками наблюдения, хотя обычно бывают изменения в интенсивности бора. Однако большое количество боров также вырождается в синусоидальные волны малой амплитуды (тип 4). Волны малой амплитуды также часто образуют боры на переднем фронте. “Прямоугольные” формы волны относительно недолговечны, и только в одном случае видно, как одна такая волна распространяется через все 3 станции. Это говорит о том, что прямоугольная форма может быть “промежуточной” формой волны в процессе преобразования. На задней стороне волны наблюдается относительно немного боров, и они, как правило, недолговечны.

При рассмотрении всех типов трансформации видно, что между станциями “slope” и “break” 62% волн претерпевают хотя бы один тип трансформации, тогда как между “Break” и “Shelf” 28% волн претерпевают трансформацию. Только 41% волн не меняют тип волны между 3 станциями. Высокий процент волн, которые меняют форму между станций на склоне и изломом шельфа, указывает на сильное влияние батиметрии обмена на процесс преобразования, когда глубина воды изменяется от 109 до 78 м.

На основе наблюдаемых трансформаций можно предложить последовательность шагов, которым могут подвергнуться все волны на пути к обрушению волны. Отсутствие некоторых шагов в

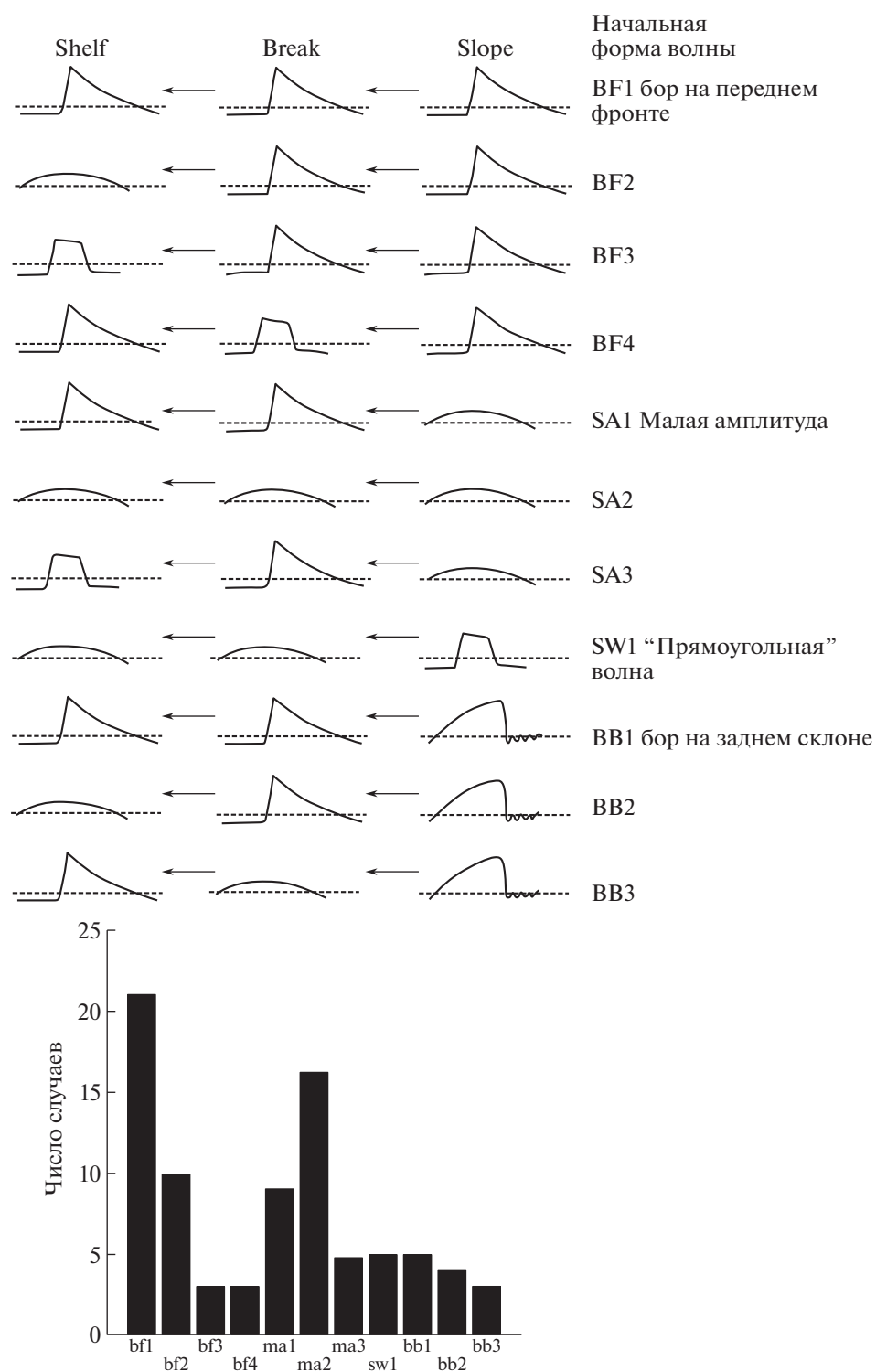


Рис. 4. Различные волновые трансформации, отмечаемые на заякоренных станциях при движении волны от материкового склона на шельф, и их статистика (в виде гистограммы, показанной внизу рисунка).

некоторых наблюдениях может быть косвенным результатом того, что некоторые шаги недолговечны. Предлагаемая последовательность — Тип 4–5–1–3–5, т.е. синусоидальная волна малой амплитуды нарастает по амплитуде по мере

того, как она увеличивает крутизну, чтобы обрушить волну большой амплитуды. Затем на передней поверхности волны образуется бор, который часто ассоциируется с рядом солитонов. После дальнейшего увеличения крутизны на задней сто-

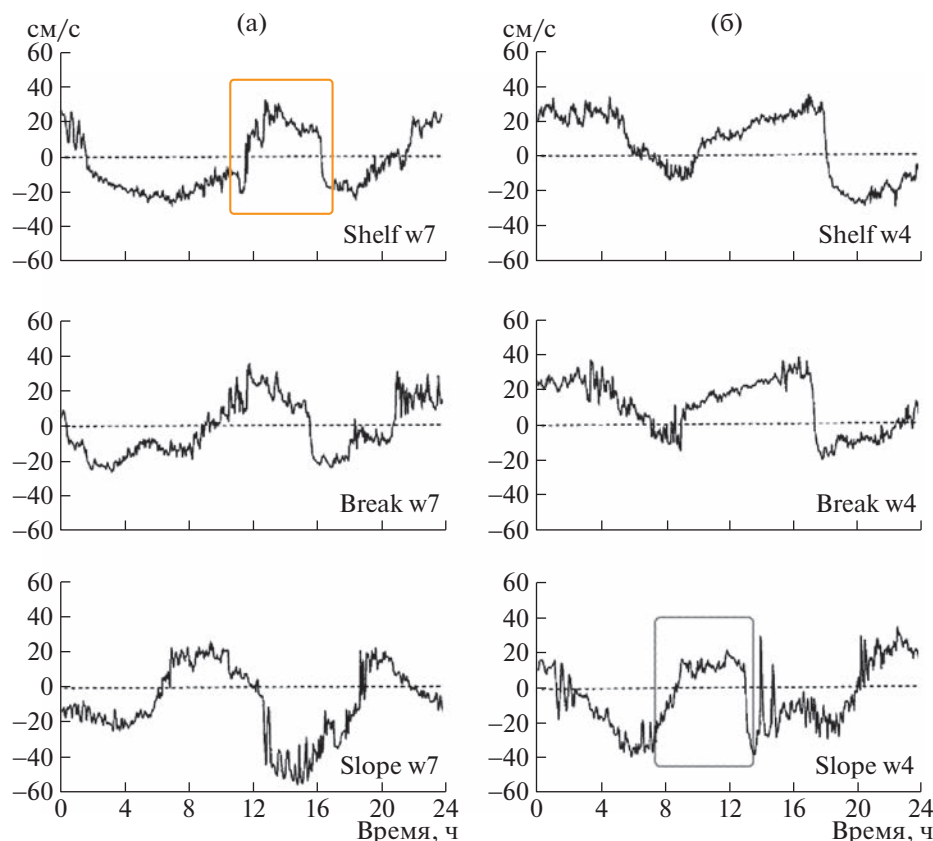


Рис. 5. а — трансформация приливной волны с бором на заднем склоне в прямоугольную волну (выделена красным) при выходе на мелководье; б — трансформация прямоугольной волны (выделена серым) в волну с бором на заднем склоне при выходе на мелководье.

роне волны образуется второй бор, создающий форму волны пьедестала. Сильное затухание или опрокидывание волны затем быстро превращает эту форму волны обратно в синусоидальную волну с малой амплитудой.

Возможна также альтернативная последовательность, когда волна Типа 2, образованная бором на задней стороне волны, возникает в начале последовательности, о чем свидетельствует наблюдение, что большинство волн Типа 2 возникает на более глубокой точке наблюдения на склоне. Возможная последовательность: Тип 4—5—2—3—1. Это почти обратная последовательность вышеописанной. В этом случае малая синусоидальная волна нарастает по амплитуде, а затем на обратной стороне волны образуется бор. Затем формируется “прямоугольная” волна, которая, в конце концов, вырождается в бор на ведущем склоне волны.

Каждую форму волны можно объяснить как проявление борообразной формы с борами как на передней, так и на задней сторонах волн. Возможно, каждая из нелинейных волн представляет собой этап между трансформациями между прямым и обратным борами. Линейные волны малой амплитуды (тип 4) могут быть результатом обруше-

ния нелинейной волны. Линейная волна большой амплитуды (тип 5) предположительно претерпевает сильную трансформацию на мелководье после дальнейшего распространения.

Подчеркнем результат полученных данных, связанных с обнаружением при трансформации распространяющихся по шельфу внутренних приливов не только традиционных внутренних боров, но и необычных “square” (прямоугольных волн). Хотя эти волны представляют собой промежуточную фазу нелинейной трансформации, относительно недолгую по времени, но все-таки эта фаза живет, по крайней мере, в течение нескольких часов. Эти волны образуются при движении бароклинного прилива с глубокой воды на мелководье. Выходя со материкового склона на шельф, волна с бором на заднем склоне, приливная волна укручивает передний склон, при этом сохраняется крутой задний склон. В результате чего образуется прямоугольная волна, см. рис. 5 а. Оценки показывают, что дистанцию около 6.5 км прямоугольная волна проходит за 4 ч со скоростью около 0.45 м/с. Объяснение феномена прямоугольной волны возможно искать в применении подхода разработанной модели [12]. Выходя на мелководье, передний фронт попадает в зону,

где термоклин более прижат ко дну. Что усиливает коэффициент нелинейности, что и ведет к укручиванию переднего фронта.

Интересен также случай преобразования прямоугольной волны в волну с крутым задним фронтом, что также возможно при выходе на мелководье. См. рис. 5 б.

Возникновение боров зависит от условий среды, где распространяются внутренние приливы и, в частности, при применении теории уравнения Кортевега—де Вриза зависит от значения коэффициента нелинейности $\alpha(n)$. Когда термоклин поднят близко к поверхности моря, α будет положительным, в этом случае появляются боры на тыльной стороне волны (тип 3). Когда термоклин находится близко к морскому дну, α отрицательно и зарождаются боры на переднем склоне волны (тип 1). Также играет роль на смену знака α фоновое течение. В работе [12] разработана модель, основанная на расширенном вращательно-модифицированном уравнении Кортевега—де Вриза для синусоидальных внутренних приливных волн, нелинейно трансформирующихся при их распространении по шельфу, и генерирующих цуги солитоноподобных волн. Совместное действие нелинейности и вращения приводит к ряду интересных особенностей формы волны, включая солитоны обеих полярностей, “толстые” солитоны и острые волны с крутыми фронтами. Вращение увеличивает фазовую скорость длинного внутреннего прилива, уменьшает количество внутренних уединенных волн, образующихся из длинной волны, и изменяет форму волн. Результаты численного моделирования сравниваются с текущими и температурными наблюдениями за внутренним волновым полем на северо-западном шельфе Австралии, которые подтверждают многие особенности обобщенной модели КдВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе проведен анализ многосуточной записи данных о течении и колебаний температуры, зарегистрированных на участке северо-западного шельфа Австралии — известного места, где существуют большие нелинейные внутренние приливы. Проведенный нетрадиционный анализ 130 полусуточных приливных волн позволил выявить их разнообразие и наиболее распространенные фазы их нелинейных трансформаций. Было выделено пять характерных типов приливных полусуточных волн, наблюдающихся на австралийском шельфе. Далее они перечисляются в последовательности частоты встречаемости — от наибольшей к наименьшей. Это наиболее распространенный тип 1 нелинейной волны с бором на переднем склоне волны. Тип 4 волны, второй по встречаемости, представляет собой колебание малой амплитуды,

приблизительно синусоидальное. Его происхождение можно связывать с разрушением сильнонелинейных внутренних приливных волн, движущихся по шельфу. Третий по встречаемости оказывается тип 2 нелинейной волны с бором на задней поверхности волны. Немного реже встречается тип 3 волны, которую мы называем “прямоугольной” (square) волной, для которой характерно одновременное присутствие боров как на переднем, так и на заднем склоне волны. Тип 5 — наиболее редко встречающаяся синусоидальная волна без признаков нелинейных искажений.

Касательно нелинейных трансформаций. В наблюдениях выявлено всего 11 видов трансформаций, проходящих по шельфу нелинейных внутренних приливных волн. Выделим наиболее часто встречающиеся случаи. Наибольшее число случаев связано с проходом нелинейных волн типа 1 без изменения формы. Почти вдвое меньше случаев, когда нелинейная волна с передним бором пройдя две точки наблюдения разрушается на подходе к третьей и превращается в синусоидальную волну малой амплитуды. Распространены случаи, когда волна малой амплитуды, начиная с первой точки наблюдения (slope), набирает амплитуду и превращается в нелинейную волну с бором на переднем склоне, проходя в таком виде остальную часть трассы. Прохождение по трассе волны малой амплитуды также достаточно часто встречается, но, по-видимому, в акватории ближе к берегу, все-таки происходит накопление нелинейных эффектов с ростом амплитуды, укручивание переднего фронта и дальнейшего разрушения волны. Интересны также случаи наблюдения прохождения прямоугольной волны через точку “slope”, после чего волна разрушается. Также интересны случаи трансформации, проходящей через точку “slope” волны с бором на заднем склоне в сильно нелинейную волну с бором на переднем склоне.

Данная работа сконцентрирована на трансформациях внутренних приливов, хотя короткопериодные волны (солитоноподобные волны) встречаются очень часто и заслуживают отдельного внимания как важный элемент процесса нелинейной трансформации. Следует заметить, что при работе с материалом мы столкнулись с признаками в коротких волнах принадлежности ко 2-й моде, но не стали это обсуждать. Недавно опубликованная статья о наблюдении внутренних волн в более глубоком месте на северо-западном шельфе Австралии содержит данные о зарегистрированных там термисторными цепочками солитонов внутренних волн 2-й моды [13].

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Эта работа получила финансовую поддержку от Австралийского исследовательского Совета. На послед-

нем этапе подготовки публикации работа выполнена при поддержке государственного задания РФ по теме № FMWE-2021-0010, а также гранта РФФИ (проект 20-55-S52005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bains P.G.* Satellite observations of internal waves on the Australian North-west shelf // *Aust. J. Mar. Freshwater Res.* 1981. V. 32. P. 457–462.
2. *Holloway P.E.* On the semi-diurnal internal tide at the shelf-break region on the Australian North West shelf // *J. Phys. Oceanogr.* 1984. V. 14. P. 1778–1790.
3. *Holloway P.E.* Observations of internal tide propagation on the Australian North West Shelf // *J. Phys. Oceanogr.* 1994. V. 24. P. 1706–1716.
4. *Huthnance J.M.* Internal tides and waves near the continental shelf edge // *Geophys. Fluid Dyn.* 1989. V. 48. P. 81–106.
5. *Tang D., Moum J.N., Lynch J.F., Abbot P., Chapman R., Dahl P.H., Duda T.F., Gawarkiewicz G., Glenn S., Goff J.A., Ggraber H., Kemp J., Maffei A., Nash J.D., Newhall A.E.* Shallow Water'06: A joint acoustic propagation/nonlinear internal wave physics experiment // *Oceanography*. 2007. V. 20. № 4. P. 156–167.
6. *Ramp S.R., Chiu C.S., Bahr F.L., Lynch J., Duda T., Tang D., Liu A.K.* Tracking the generation sites and packet variability of internal solitons in the south China Sea // *The Journal of the Acoustical Society of America* 2002. V. 112. № 5. P. 2449–2449.
7. *Holloway P.E.* On the dissipation of internal tides // *Tidal hydrodynamics*. 1991. V. 449. P. 466.
8. *Holloway P.E.* Internal hydraulic jumps and solitons at a shelf break region on the Australian North West shelf // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92 (C5). P. 5405–5416.
9. *Smyth N.F., Holloway P.* Hydraulic Jump and Undular Bore Formation on a Shelf Break // *J. Phys. Oceanogr.* 1988. V. 18. P. 947–962.
10. *Serebryany A.N., Holloway P.E.* Observations of nonlinear internal waves on a shelf break: variety of processes of internal tidal transformation and observed huge internal surf // *Proceedings of IAPSO XXI General Assembly*. 1995. Honolulu, Hawaii, USA. P. 230.
11. *Holloway P.E., Pelinovsky E., Talipova T., Barnes B.* A Nonlinear Model of Internal Tide Transformation on the Australian North West Shelf // *J. Phys. Oceanogr.* V. 27. P. 871–896.
12. *Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T.* A generalized Korteweg-de Vries model of internal tide transformation in the coastal zone // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104, № C8. P. 18.333–18.350.
13. *Rayson M.D., Jones N.L., Ivey G.N.* Observations of large-amplitude mode-2 nonlinear internal waves on the Australian North West shelf // *Journal of Physical Oceanography*. 2019. V. 49. №. 1. P. 309–328.

A VARIETY OF TRANSFORMATIONS OF NONLINEAR INTERNAL TIDAL WAVES ON THE NORTH-WEST AUSTRALIAN SHELF

P. E. Holloway^a and A. N. Serebryany^{b,c,#}

^a*School of Geography and Oceanography, University College, University of New South Wales, Academy of Australian Army, Canberra, ACT 2600, Australia*

^b*P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^c*JSC “N.N. Andreev Acoustic Institute”, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: serebryany@hotmail.com*

Presented by Academician of the RAS R.I. Nigmatulin October 10, 2022

Highly non-linear internal waves at the continental margin on the northwest shelf of Australia are discussed using detailed velocity and temperature time series recorded from moored current meters. The region has a vigorous semidiurnal inland tide that propagates towards the shore along the shelf. In this area, there is an increase in the internal tide and the formation of bore-like formations, often accompanied by internal solitary waves. In this paper, the emphasis is on the analysis of the shape and properties of the internal tide. The frequency spectrum of internal waves is presented, calculated from the records of the current component directed along the normal to the coast. Five different types of waves are distinguished, which consist of burrs on the front or back side of the wave, “square” waveforms with a bores on both the front and back sides of the wave at the same time, as well as linear waves of small and large amplitude. The statistics of transformations of the types of internal tides during their propagation along the section of the route from the slope to the shelf is given. The main types of waves passing without transformation and waves with a short lifetime, which include “square” tidal waves and waves with bores on the back slope of the wave, are revealed. In general, the analysis showed a real picture of the ongoing nonlinear transformations of tidal internal waves occurring on the north-west shelf of Australia.

Keywords: Australian North West shelf, solitons, internal tide, currents