

УДК 551.46

© В.Ф.Кукарин¹, В.Ю.Ляпидевский², В.В.Навроцкий³, Ф.Ф.Храпченков³, 2013

¹Институт неорганической химии им. А.В.Николаева СО РАН, Новосибирск

²Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

³Тихоокеанский океанологический институт им. В.И.Ильичева ДВО РАН, Владивосток

kukarin@niic.nsc.ru

ЭВОЛЮЦИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ В ЗОНЕ ЗАПЛЕСКА

Проведены исследования динамики короткопериодных внутренних волн большой амплитуды в зоне «заплебка», т.е. выше области контакта основного термоклина с дном. Показано, что процесс генерации пакетов уединенных волн является перемежающимся и наблюдается в течение нескольких месяцев существования развитого сезонного термоклина (август–октябрь). При этом распространение и разрушение внутренних волн вносят существенный вклад в процессы массообмена и вентиляции вод в шельфовой зоне. Анализ структуры придонных уединенных волн в зоне «заплебка» показывает, что они распространяются в виде симметричных линз холодной воды или принимают пилообразную форму в зависимости от фазы разрушения.

Ключевые слова: внутренние волны, солитоны, придонный термоклин, шельфовая зона, натурный эксперимент.

Для создания физически обоснованных математических моделей мелкомасштабных явлений в океане и атмосфере необходимы тщательное исследование и параметризация процессов, имеющих характерные пространственные масштабы. В число таких процессов попадают многие волновые явления на границе раздела воздушной и водной сред, в толще атмосферы и океана, мелкомасштабные процессы перемешивания, формирования тонкой структуры стратификации и т.п. В частности, большое влияние на интенсификацию процессов массопереноса и диссипации энергии в прибрежной зоне океана оказывают особенности распространения нелинейных внутренних волн и гравитационных течений. Определение основных гидродинамических параметров таких течений имеет большое значение как для уточнения граничных условий при проведении математического моделирования и интерпретации данных натурных наблюдений в шельфовой зоне, так и для оценки интенсивности ряда локальных процессов, например динамики перемешивания и распространения фронтов теплых и холодных вод в прибрежной зоне при взаимодействии стратифицированных приливных течений с шельфом.

Проблемам генерации внутреннего прилива на границе шельфовой зоны и его трансформации в пакет интенсивных внутренних волн (ВВ) посвящено большое число натурных, лабораторных и численных исследований [1–2]. Однако разработанные физические и математические модели распространения внутренних волн часто оказываются непригодными для описания процессов выхода волн в область контакта пикноклина с дном. Но именно в этой зоне, которую по аналогии с динамикой поверхностных волн при их выходе на берег будем называть «зоной заплебка» внутренних волн («swash zone»), и происходят наиболее важные гидродинамические процессы, влияющие на вертикальный тепло- и массообмен, перенос примесей и осадков, а также эффективную диссипацию энергии ВВ.

Как правило, основные натурные эксперименты по идентификации внутренних волновых процессов проводились в достаточно глубокой части шельфовой зоны для то-

го, чтобы отслеживать эволюцию основного термоклина (пикноклина). В мелководной части шельфа выше уровня контакта основного термоклина с дном вертикальное распределение температуры (плотности) в основном близко к однородному, и считалось, что эта зона свободна от внутренних волн. Немногочисленные натурные наблюдения [3–5] показывают, что квазиволновая активность сохраняется и в мелководной части шельфовой зоны на достаточно большом удалении от границы контакта, причем наблюдается принципиальное изменение структуры поля плотности в «зоне заплеска». Короткопериодные волны преобразуются в последовательность отдельных линз более плотной воды, распространяющихся на достаточно большие расстояния в направлении береговой линии. Численно влияние топографии на процесс трансформации волнового режима течения в вихревой («solibore» formation) изучался в работах [6–9]. В лабораторных экспериментах распад внутренней волны в серию уединенных вихревых образований («bolus» formation) также является объектом интенсивных исследований [10–11].

В данной статье приводятся результаты исследования эволюции придонных внутренних волн при их выходе на глубины менее 20 м. Натурные наблюдения выполнены в шельфовой зоне Японского моря, в районе экспериментальной станции ТОИ ДВО РАН. Интенсивные солитонобразные волны повышения в придонном термоклине наблюдались здесь и ранее [12–14]. При этом для определения профиля волны в придонной области эффективно применялись распределенные датчики температуры или их комбинации с точечными датчиками [15, 16]. В данной работе для измерения вертикального профиля температуры использованы гирлянды с большим числом точечных датчиков температуры, позволяющие не только оценить амплитуду внутренних волн, но и восстановить внутреннюю структуру придонных колебаний термоклина. Цель состоит в том, чтобы дать качественное описание динамики цугов внутренних волн и выделить характерные особенности перехода от волнового движения к вихревому в зоне «заплеска», необходимые для построения адекватной математической модели.

Распределенная система регистрации внутренних волн. Исследования динамики внутренних волн в прибрежной зоне Японского моря были проведены Институтом гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН и Институтом неорганической химии им. А.В.Николаева СО РАН совместно с Тихоокеанским океанологическим институтом им. В.И.Ильичева ДВО РАН на гидрофизическом полигоне ТОИ ДВО РАН в августе–октябре 2011–2012 гг. с целью исследования механизма разрушения внутренних гравитационных волн. Гидрофизический полигон «МЭС Шульц» отличается высокой активностью различных гидродинамических процессов в окрестности границы шельфовой зоны, регулярностью воспроизведения мощных внутренних приливов и их трансформации в цуги интенсивных внутренних волн (рис.1, а, б). Наличие подводного каньона также способствует интенсификации волновых и вихревых гидродинамических процессов в шельфовой зоне.

Для непрерывной регистрации параметров внутренних волн использован комплекс аппаратуры, включающий датчики температуры и давления, телеметрическую систему сбора и обработки данных и соответствующее математическое обеспечение для получения оценок трансформации внутренних гравитационных волн в прибрежной зоне моря на глубинах до 30 м при удалении от берега до 500 м. Основой комплекса являлась донная станция, которая состояла из 1–3 термогирлянд (В1, В2, В3), содержащих по 20–30 датчиков и удаленных друг от друга на расстояние до 50 м. Система опрашивалась последовательно-параллельно микропроцессором С8051F410. Предварительно обработанная информация непрерывно передавалась на берег по подводному кабелю и при помощи радиосвязи. Пространственное разнесение термогирлянд позволяло оценить пространственно-временную изменчивость температурных полей в придонной области. Одновременно с измерениями колебаний температуры воды для оценки колебаний уровня моря измерялись давление, температура и соленость с помощью приборов SBE 26+ и РУМ (разработка ТОИ), установленных на дне вблизи донных станций.

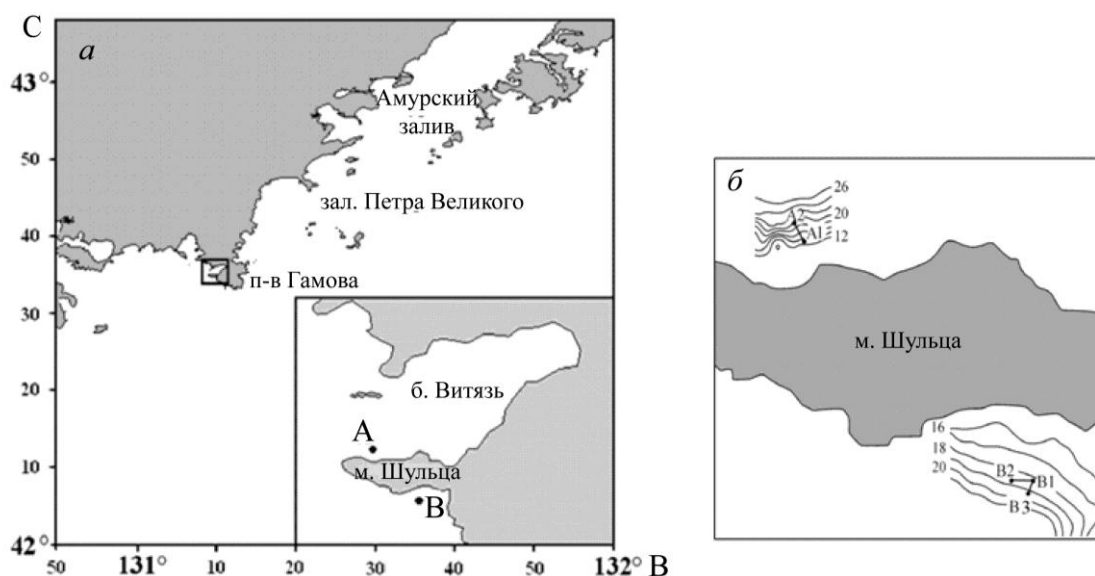


Рис.1. Карта-схема района работ и расположение донных станций (А, В).

В качестве базового сенсора температуры использован микрочип 1-Wire® Digital Thermometer DS18B20 фирмы «Dallas semiconductor», позволяющий дискретно измерять температуру с интервалом 0.125°C в диапазоне от -5 до $+40^{\circ}\text{C}$. Сенсоры были объединены в термогирлянды (заякоренные с использованием тяжелого груза, чтобы исключить вертикальные перемещения) с последовательным интерфейсом. Вертикальное положение термогирлянды обеспечивалось достаточной плавучестью буя, притопленного на глубину 5–10 м, для того чтобы исключить влияние поверхностного волнения на вертикальные смещения датчиков.

В течение нескольких месяцев было проведено непрерывное измерение полей температуры в придонном 10–15-метровом слое с использованием от 1 до 3 гирлянд датчиков температуры, расположенных в каждой гирлянде на расстоянии 50 см друг от друга. Относительно невысокая точность измерения температуры, связанная с цифровой обработкой сигнала, используемой микросхемой, компенсировалась большими вертикальными градиентами температуры, позволявшими фиксировать даже незначительные вертикальные движения жидкости, и возможностью создания относительно дешевых распределенных систем сбора информации в режиме реального времени. Малый объем микросхемы обеспечивал необходимую пространственную детализацию проводимых измерений. Для упрощения конструкции термогирлянды датчики температуры помещались в тонкостенный латунный цилиндр с толщиной стенок 0.5 мм и диаметром 8 мм, которые для лучшего термического контакта с окружающей средой заполнялись термопастой. При этом постоянная времени увеличивалась от 3 с для открытого датчика до 8 с для герметизированного датчика. Поскольку характерными параметрами исследуемого волнового процесса являются внутренние волны с периодами 10–60 мин и перепадом температуры в термоклин в несколько градусов, представленная конструкция заведомо обеспечивает измерение реальных волновых процессов.

Для анализа высокочастотных колебаний температуры были оценены динамические и демпфирующие свойства данной системы измерений. С этой целью проведено лабораторное тестирование датчиков. Пара датчиков, один из которых был помещен в латунную трубку, заполненную термопастой КТП-8, а другой оставался полностью открытым, были помещены в сосуд с пресной водой, в котором создавалась температурная стратификация с перепадом в $5\text{--}10^{\circ}\text{C}$. Датчики, расположенные на одном уровне, перемещались вертикально с постоянной скоростью, пересекая термоклин, затем выдерживались некоторое время в верхнем или нижнем однородном слое и начинали двигаться с

той же скоростью в противоположном направлении. Интервалы движения и остановок были фиксированы, и результирующее периодическое движение с достаточной точностью имитировало воздействие гармонической внутренней волны с периодом 3 мин на неподвижный датчик. На рис.2, *а* представлены показания двух датчиков, движущихся указанным способом. Период колебаний – 180 с (55 с – движение, 35 с – остановка), амплитуда колебаний – 0.25 м. На рис.2, *б* изображено начальное распределение температуры по вертикали. За время движения датчиков (5 циклов) отклонение профиля температуры от начального составило около 10 %. Результаты тестирования иллюстрируют в представленном диапазоне температур динамические характеристики используемой в натурных условиях измерительной системы, в которой в зависимости от конфигурации и количества датчиков время опроса составляло от 5 до 60 с.

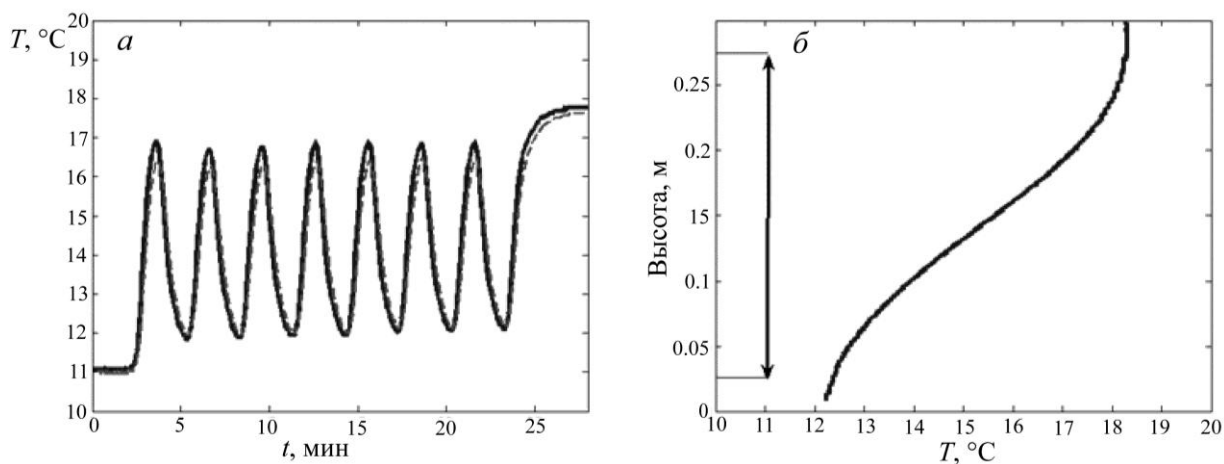


Рис.2. Зависимость температуры от времени при периодическом пересечении термоклина открытым (сплошная линия) и заделанным (штриховая линия) датчиками (*а*) и начальное вертикальное распределение температуры в термоклине (*б*) (стрелки – диапазон вертикальных перемещений датчиков).

Динамика внутренних волн в прибрежной зоне. При непрерывной регистрации колебаний температуры с помощью описанной выше распределенной системы термодатчиков на глубинах до 30 м в течение достаточно длительного периода наблюдений (август–октябрь 2011–2012 гг.) получен большой объем информации о структуре внутренних волн в прибрежных районах Японского моря. Здесь мы представим только результаты, иллюстрирующие динамику внутренних волн в зоне «заплеска», т.е. в ситуации, когда глубина залегания основного термоклина больше глубины дна в районе измерительного комплекса. В этом случае внутренние волны наблюдаются только в течение определенного периода суток, когда амплитуда внутренних волн, генерируемых в шельфовой зоне, обеспечивает их «заплеск» на достаточно большие расстояния от зоны контакта термоклина с дном.

В качестве репрезентативного периода выбран сентябрь 2011 г. К сентябрю формируется верхний однородный слой, достигающий глубины 25–30 м, и в результате распада внутреннего прилива на границе шельфовой зоны генерируются регулярные пакеты внутренних волн, распространяющихся в сторону берега [17]. В результате последовательного заглубления термоклина зона заплеска внутренних волн смещается от берега, и на донной станции, установленной на глубине около 20 м, можно проследить различные этапы деформации внутренних волн от усиления эффектов нелинейности до полного разрушения. На рис.3 представлены данные о распределении температуры на различных горизонтах в придонном 10-метровом слое на ст. В (внешняя сторона м.Шульца, рис.1). На рис.3, *а* изображена зависимость температуры от времени в период с 03.09 по

10.09.2011 г., измеренная при помощи гирлянды B_2 (глубина 19 м). Каждая сплошная линия – показания одного датчика температуры на соответствующем горизонте. Расстояние между датчиками – 0.5 м, вертикальная гирлянда датчиков начинается у дна. На рис.3, б приведены результаты измерений одной гирляндой датчиков (гирлянда B_1 , глубина 18 м) в период с 22.09 по 11.10.2011 г. На участках, где линии сходятся, распределение температуры в нижнем 10-метровом слое близко к однородному. При расхождении линий в этом слое наблюдается выраженная устойчивая стратификация по температуре. Из рисунков видно, что периоды, когда вертикальная стратификация в районе станции практически отсутствует, сменяются периодами сильного изменения температуры воды по вертикали. Это расслоение обусловлено прохождением цугов придонных внутренних волн. Регулярность появления таких волн в зоне «заплеска» связана с распадом внутреннего прилива и подробно обсуждается в [17]. Следует отметить, что одновременная регистрация поля придонных внутренних волн на вертикальных гирляндах, разнесенных на 40–60 м, дает возможность определить не только амплитудные, но и фазовые характеристики наблюдаемых волн. Так как перепад глубин в районе донной станции сравнительно небольшой (18–20 м), отдельные волны могут быть идентифицированы на различных участках их распространения (гирлянды B_1 – B_3). Фрагменты записи температуры, изображенные на рис.4, показывают более детальную структуру поля температуры в пакете внутренних волн. Отметим, что при прохождении внутренних волн большой амплитуды температура воды меняется в нижнем 10-метровом слое в течение нескольких минут на 5–10°C. Рассматриваемый процесс является очень важным для вентиляции шельфовой зоны, и он существенно влияет на горизонтальный и вертикальный массообмен в прибрежных водах, распространение звука в воде и другие физические явления.

Зависимости температуры от времени на фиксированных горизонтах, изображенные на рис.3, 4, дают представление о частоте и амплитуде внутренних волн, так как синхронное изменение температуры сразу на нескольких уровнях определяет амплитуду волны, проходящей через гирлянду датчиков. Заметим, что данные, представленные на рис.3, 4, могут быть доступны в режиме on-line для удаленного пользователя, подключенного к Интернету, и дают возможность оценить волновую активность в данном районе непосредственно во время проведения натурного эксперимента. Однако более полную структуру наблюдаемых волн отражает изменение положения изотерм со временем, рассчитанное по результатам измерения поля температуры на одной из вертикальных гирлянд.

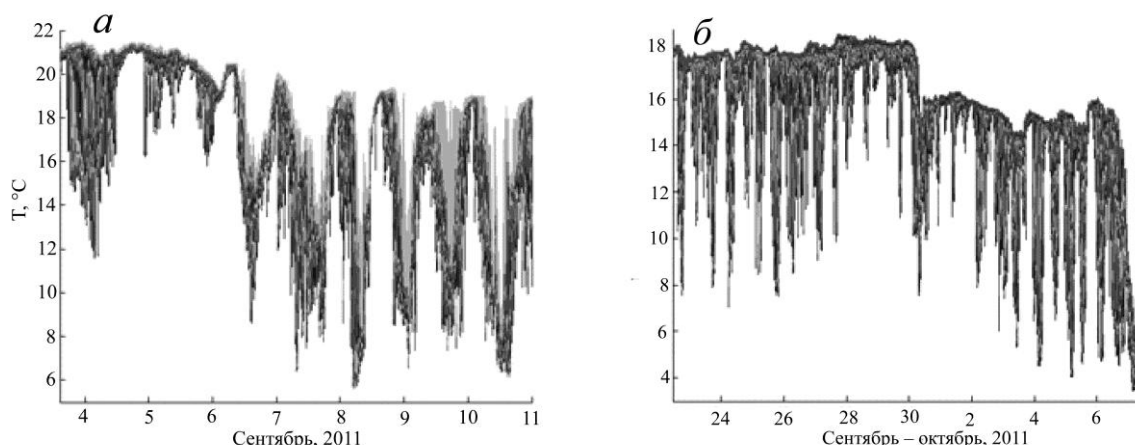


Рис.3. Изменение температуры в придонном 10-метровом слое на ст.В.

а – гирлянда B_2 , глубина 19 м, 3–11.09.2011; б – гирлянда B_1 , глубина 18 м, 22.09–08.10.2011.

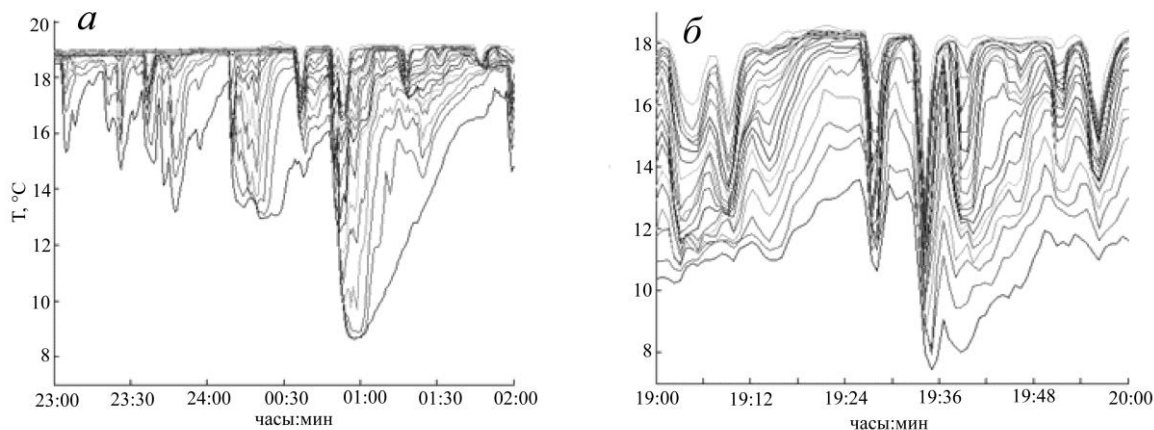


Рис.4. Фрагменты записи вариации температуры на горизонтах, гирлянда B_2 .

a – 7–8.09.2011; b – 9.09.2011.

Анализ записи температуры на фиксированных горизонтах (рис.3) показывает, что волновая активность в придонном слое в районе измерительного комплекса весьма неоднородна по времени. Интенсивные пакеты внутренних волн наблюдаются в течение 4–6 ч, затем следует период «затишья». В данной работе основное внимание сосредоточено на качественном описании структуры внутренних волн большой амплитуды в «зоне заплеска», поэтому для представления результатов измерений волновых пакетов выбран интервал времени (4 ч), приходящийся на период максимальной волновой активности. На рис.5, 6 показана эволюция изотерм в придонном слое при распространении волновых пакетов в районе ст.А (рис.1) в сентябре 2011 г. Уклон дна в районе станции достаточно большой ($\alpha = 4.5^\circ$). Среднее заглубление основного термоклина в период измерений составляло 20–25 м. Поэтому обе гирлянды датчиков, установленные на глубине 13 и 19 м и фиксирующие вертикальное распределение температуры в придонном 10-метровом слое с интервалом 0.5 м, находились в зоне «заплеска» внутренних волн. Расстояние между гирляндами – 76 м, азимут – 146° . На глубине 19 м (гирлянда A_2) внутренние волны содержат линзы холодной воды с температурой 6–12°C, разделенные более теплой водой с температурой 14–18°C (рис.5, b ; 6, b , z). При распространении в сторону берега частицы более холодной жидкости переносятся вместе с волной, т.е. реализуется вихре-волновой режим течения. Структура таких волн, получивших название внутренних волн с «захваченным ядром», является объектом интенсивных исследований и, в частности, соответствует внутренним уединенным волнам большой амплитуды, реализованным в лабораторном эксперименте ([18], рис.5, a , b). В этой работе также приведена библиография по экспериментальному, численному и аналитическому исследованию внутренних волн с «захваченным ядром». В процессе трансформации в прибрежной зоне между двумя термогирляндами структура цуга внутренних волн существенно меняется. На глубине 13 м (гирлянда A_1) соответствующий цуг волн может быть представлен как несимметричными пилообразными внутренними волнами повышения (рис.5, a), которые в дальнейшем для краткости будем называть N -волнами, так и серией симметричных уединенных волн (рис.6, a) или комбинацией симметричных уединенных волн и N -волн (рис.6, b). Механизм формирования симметричных и несимметричных уединенных волн обсуждается в [18] в рамках дисперсионной модели трехслойной мелкой воды. Эксперименты по распространению внутренних волн в зоне «заплеска» показывают, что форма волны существенно зависит от толщины слоя холодной воды перед ее фронтом. При распространении волны по «сухому руслу», т.е. когда перед фронтом слой холодной воды отсутствует, переносимая волной жидкость резко турбулизируется ([18], рис.6) и фронт волны принимает форму гравитационного течения. Такое течение при распространении вверх по склону теряет «захваченное ядро» и

распространяется в виде N -волны (рис.5, a ; см. также [18], рис.7). Используя рис.5, 6, не трудно вычислить скорость распространения индивидуальной волны, так как положение гребней отдельных волн легко определяется из рисунков. По разности времен регистрации фронтов на термогирляндах, изображенных на рис.5 (по изобате 18°), и расстоянию между ними получаем среднюю скорость порядка 32 см/с. Но речь может идти только о средней на участке между гирляндами скорости волны, так как имеется сильная зависимость ее от амплитуды. Кроме того, из представленных данных может быть вычислена только проекция скорости распространения волны на направляющую, соединяющую две гирлянды. Однако с учетом достаточно большого перепада глубин между гирляндами (6 м) можно считать, что фронты набегающих волн почти параллельны изобатам, т.е. измеренная скорость волны близка к фазовой. Для наблюдаемых волн с периодами около 30 мин получаем длину волны около 600 м. Для волнового пакета, изображенного на рис.6, те же расчеты дают скорость 36 см/с и длину 450 м (для волны с периодом 20 мин).

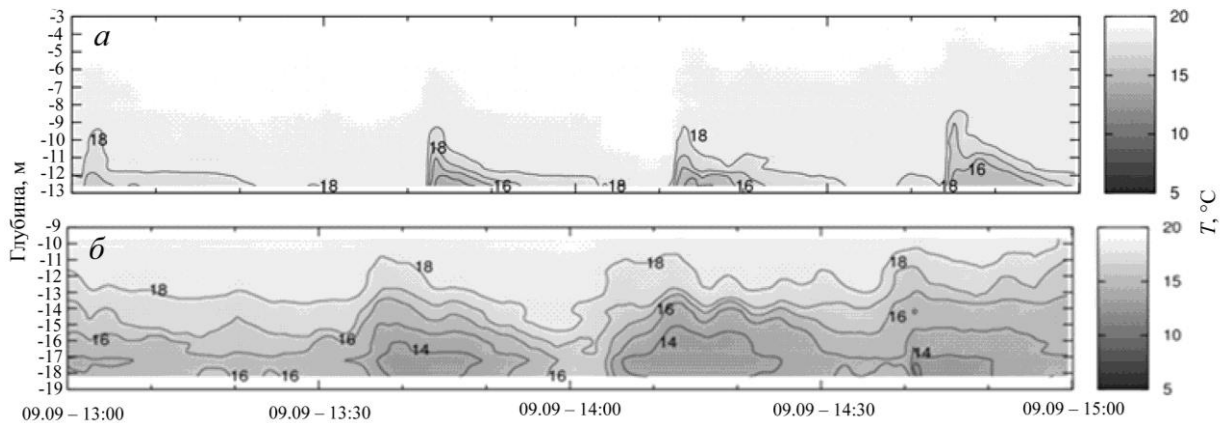


Рис.5. Эволюция волнового пакета на ст. А (9.09.2011 с 13.00 по 15.00).

a – гирлянда A_1 , глубина 13 м; $б$ – гирлянда A_2 , глубина 19 м.

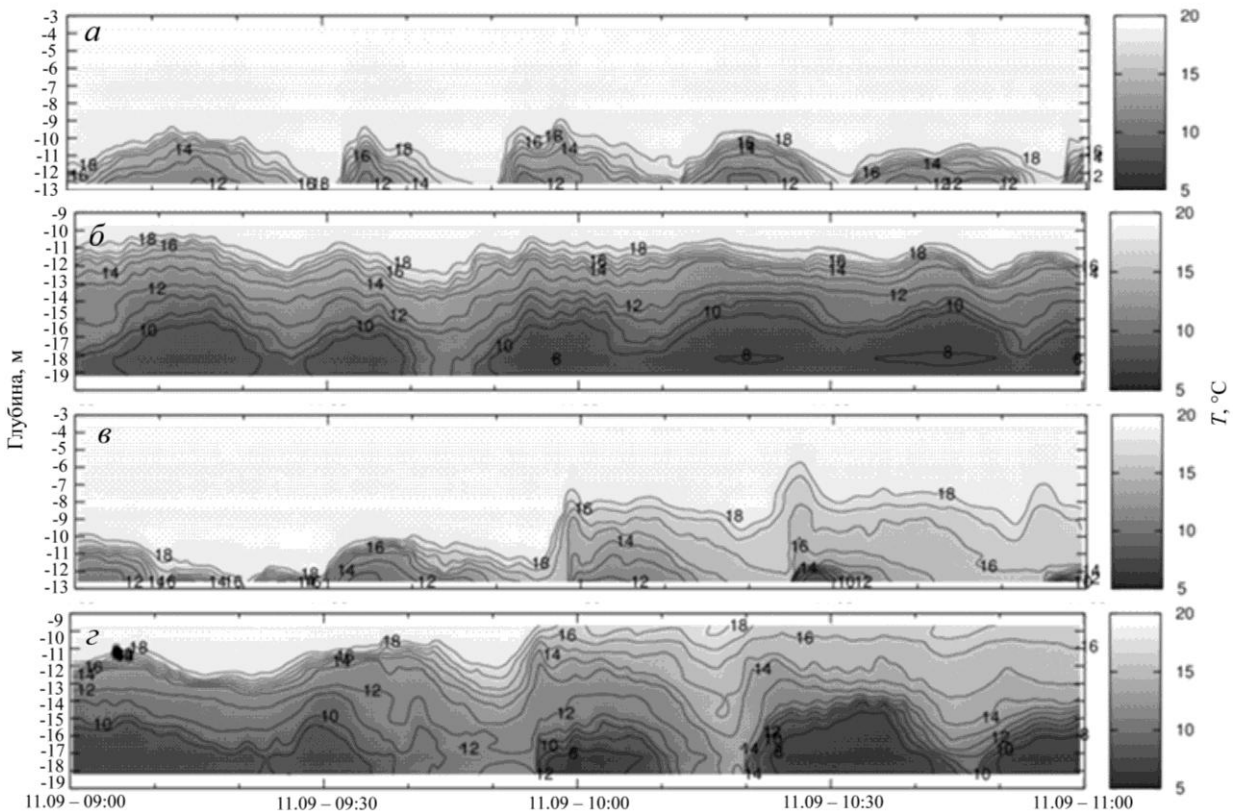


Рис.6. Эволюция волнового пакета на ст.А (11.09.2011 с 7.00 по 11.00).

$a, в$ – гирлянда A_1 , глубина 13 м; $б, з$ – гирлянда A_2 , глубина 19 м.

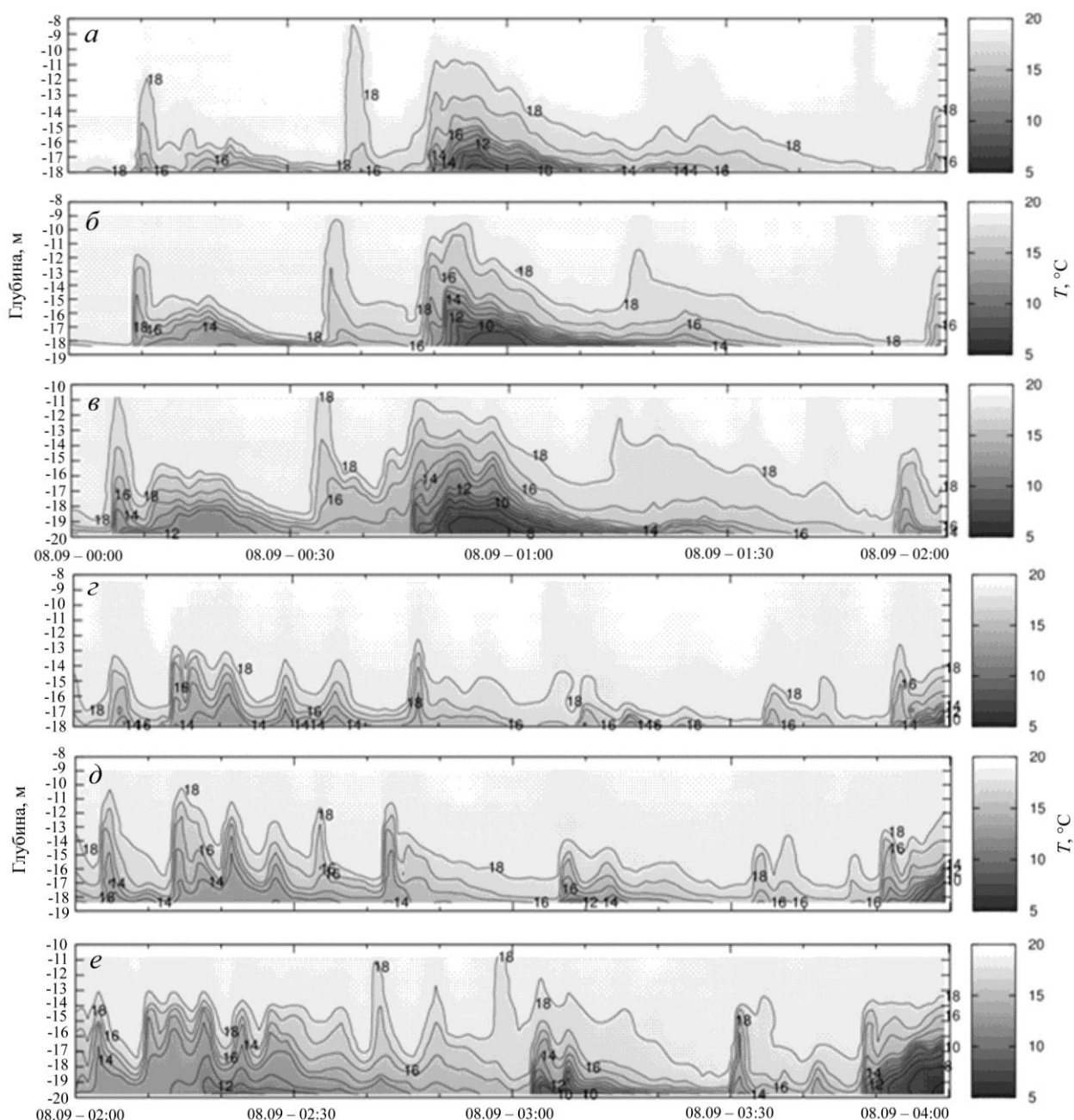


Рис.7. Вертикальное распределение температуры в придонном слое на ст.В (с 0 до 4 ч 8.09.2011).

а, г – гирлянда B_1 , 18 м; *б, д* – гирлянда B_2 , 19 м; *в, е* – гирлянда B_3 , 20 м.

Пространственная картина волнового движения может быть восстановлена по показаниям датчиков, которые расположены на трех гирляндах, разнесенных на достаточное расстояние. Эта возможность реализована на ст.В (рис.1), расположенной на подводном плато – внешней сторон м.Шульц, глубина около 20 м. Малый уклон дна обеспечивает более равномерное распространение волн в районе ст.В. Рис.7, 8 показывают распределение изотерм в придонном слое на гирляндах B_1 – B_3 в период с 8 по 10 сентября 2011 г. (интервал измерения 4 ч, в 10-метровом придонном слое). В указанные периоды станция находилась в зоне «заплеска». Расстояние между гирляндами $L_{B_1B_2} = 52$ м, азимут 139° ; $L_{B_2B_3} = 45$ м, азимут 95° ; $L_{B_3B_1} = 37$ м, азимут 197° . Рис.7, *б* соответствует фрагмент записи температуры на горизонтах, изображенный на рис.4, *а*, группа коротких уединенных волн с периодом менее 5 мин и амплитудой более 10 м, изображенных на рис.8, *а*, представлена фрагментом рис.4, *б*.

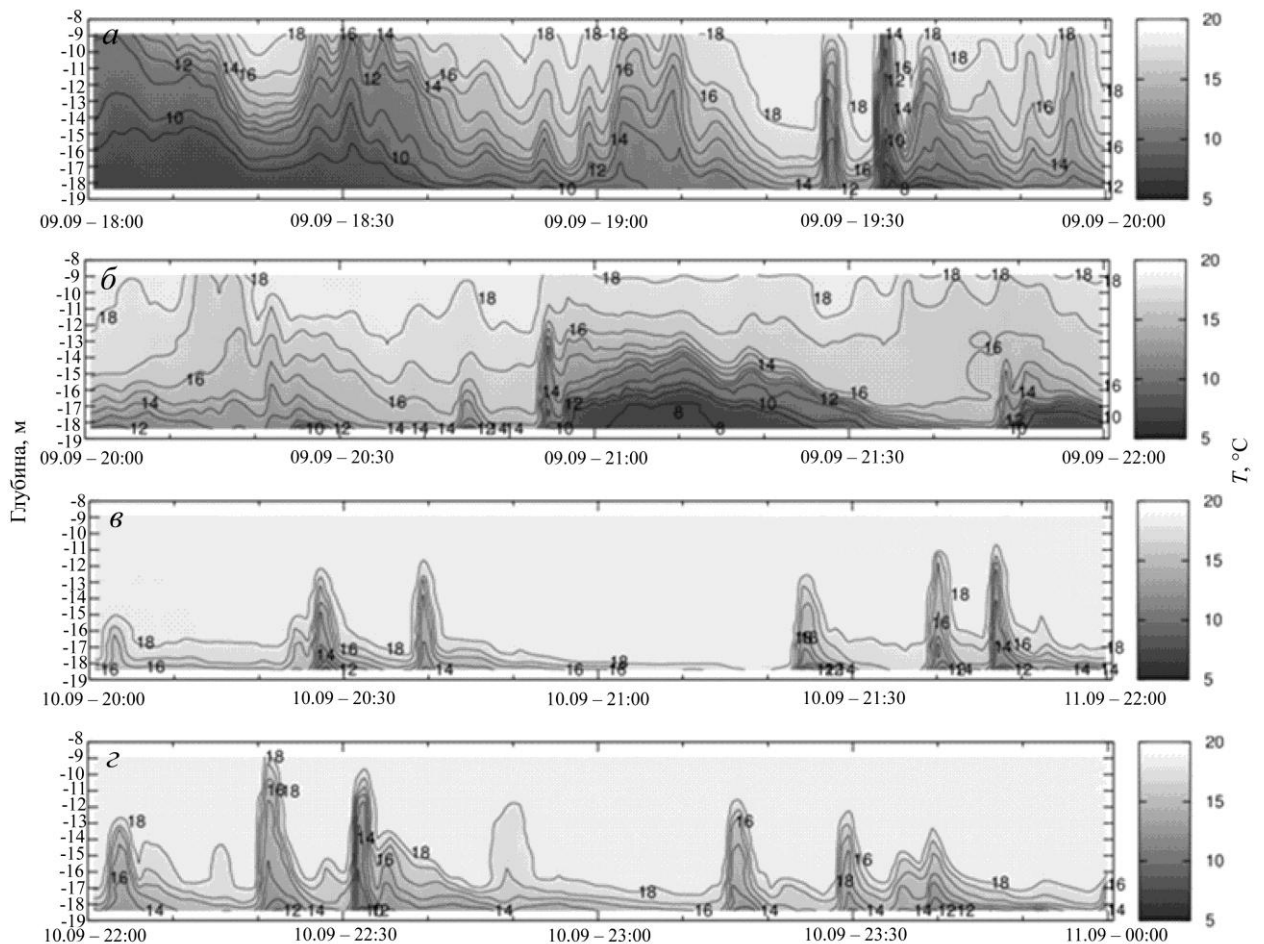


Рис.8. Вертикальное распределение температуры в придонном слое на ст.В, гирлянда B_2 , 19 м.

$a, б$ – с 18 до 22 ч 9.09.2011; $в, г$ – с 22 до 24 ч 10.09.2011.

На рис.7, 8 показаны основные типы волн, наблюдаемые в зоне «заплеска». Аналогично результатам измерений на ст.А (рис.5, 6) наблюдается прохождение симметричных линз холодной воды с периодом 5–30 мин, N -волн, а также комбинаций этих волн. На рис.7, $a–в$ и 8, $б$ можно проследить эффект частичной блокировки потока при обтекании «ядра» холодной воды более теплым потоком. При этом изотермы образуют крутой передний фронт, и течение приобретает вид N -волны с внутренним ядром. Как уже было отмечено выше, по мере продвижения к берегу холодное «ядро» отстает от фронта волны и N -волна начинает достаточно быстро разрушаться (рис.8, $в, г$). Это поведение соответствует распространению волн «по сухому руслу», описанных в лабораторных экспериментах [18, рис.6].

В то же время часть коротких интенсивных уединенных волн, изображенных на рис.8, a (см. также фрагмент рис.4, $б$), не проявляет тенденции к укручению переднего фронта, т.е. дисперсионные эффекты в них превалируют над эффектами донного трения. Такое поведение можно объяснить наличием тонкой прослойки холодной воды (10–12°C) перед фронтом, препятствующей процессу интенсивного перемешивания на фронте волны [18, 19].

В работе представлено качественное описание динамики внутренних волн в зоне «заплеска». Для регистрации короткопериодных внутренних волн с периодом 5–30 мин использована распределенная система датчиков температуры, позволяющая получать информацию о вертикальном распределении температуры в придонном слое удаленному

пользователю в режиме on-line. При помощи этой относительно простой системы регистрации получен большой объем информации о механизмах трансформации и разрушения внутренних волн в прибрежной зоне. В частности, показано, что цуг уединенных волн повышения в придонном слое выше линии контакта основного термоклина с дном может распространяться в виде отдельных линз холодной воды, в виде N -волны или комбинации этих форм. Указанные особенности волнового движения свидетельствуют о том, что для адекватного математического моделирования распространения волн в зоне «заплеска» требуется построение нового класса моделей, учитывающих одновременно эффекты нелинейности, дисперсии и турбулентного перемешивания. В частности, такие модели должны описывать трансформацию фронта внутренней волны, распространяющегося в виде волнового бора, в гравитационное течение при уменьшении толщины слоя холодной воды перед волной. Перспективным представляется использование уравнений трехслойной мелкой воды с учетом негидростатических эффектов [18], в которые дополнительно включено турбулентное перемешивание в прослойке. Результаты такого моделирования будут представлены в следующих работах авторского коллектива.

На основе разработанных математических моделей и дальнейших лабораторных и натурных экспериментов предстоит оценить ширину зоны «заплеска» внутренних волн, генерируемых различными источниками, а также средний поток массы и импульса, связанный с разрушением внутренних волн в прибрежной зоне. Механизм переноса массы в придонном слое в направлении берега является важным для понимания процесса вентилизации шельфовой зоны, ее биопродуктивности, а также для обеспечения экологической безопасности прибрежных вод.

Авторы благодарны рецензентам за конструктивные замечания.

Работа выполнена в рамках Интеграционного проекта СО РАН №15, Программы Президента РАН (проект 23.2), поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 12-01-00671) и Дальневосточным отделением РАН (проект № 12-II-CO-07-020).

Литература

1. Helfrich K.R., Melville W.K. Long nonlinear internal waves // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 2006. V.38. P.395–425.
2. Grimshaw R., Talipova T., Pelinovsky E., Kurkina O. // *Internal solitary waves: propagation, deformation and disintegration. Nonlinear Processes in Geophysics*, 2010. V.17. P.633–649.
3. Scotti A., Pineda J. Observation of the very large and steep internal waves of elevation near the Massachusetts coast // *Geophys. Res. Let.* 2004. V.31. L22307.
4. Klymak M., Moum J.N. Internal solitary waves of elevation advancing on a shoaling shelf // *Geophys. Res. Let.* 2003. V.30, N 20. P.2045. doi:10.1029/2003GL017706.
5. Bourgault D., Kelley D.E., Galbraith P.S. Interfacial solitary wave run-up in the St. Lawrence Estuary // *J. Marine Research*. 2005. V.63. P.1001–1015.
6. Lamb K. Shoaling solitary internal waves: on a criterion for the formation of waves with trapped cores // *J. Fluid Mech.* 2003. V.478. P.81–100.
7. Maderich V., Talipova T., Grimshaw R., Pelinovsky E., Choi B. H., Brovchenko I., Terletska K., Kim D.C. The transformation of an interfacial solitary wave of elevation at a bottom step // *Nonlin. Proc. in Geophysics*. 2009. 16. P.33–4.8.
8. Серебряный А.Н., Пао К.П. Прохождение нелинейной внутренней волны через точку переворота на шельфе // *ДАН*. 2008. Т.420, № 4. С.543–547.
9. Vlasenko V., Hutter K. Numerical experiments on the breaking of solitary internal waves over a slope-shelf topography // *J. Phys. Oceanography*. 2002. V.32. P.1779–1793.
10. Umeyama V., Shintani T. Visualization analysis of runup and mixing of internal waves on an upper slope // *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. 2004. V.130, N 2. P.89–97.
11. Wallace B.C., Wilkinson D.L. Run-up of internal waves on a gentle slope in a two-layered system // *J. Fluid Mech.* 1988. V.191. P.419–442.
12. Серебряный А.Н. Проявление свойств солитонов во внутренних волнах на шельфе // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 1993. Т.29, № 2. С.244–252.
13. Рутенко А.Н. Экспериментальные исследования генерации придонной турбулентности внутренними волнами // *Морской гидрофиз. журн.* 1989. № 3. С.58–61.

14. Рутенко А.Н. Влияние внутренних волн на распространение звука в шельфовой зоне Японского моря в разные сезоны года // Акустический журн. 2005. Т.51, № 4. С.1–9.
15. Коняев К.В., Сабинин К.Д. Новые данные о внутренних волнах в море, полученные с помощью распределенных датчиков температуры // ДАН СССР. 1973. Т.209, № 1. С.86–89.
16. Иванов В.А., Коняев К.В., Серебряный А.Н. Группы интенсивных внутренних волн в шельфовой зоне моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1981. Т.17, № 12. С.1302–1309.
17. Навроцкий В.В., Ляпидевский В.Ю., Павлова Е.П., Храпченков Ф.Ф. Внутренние волны и перемешивание в шельфовой зоне моря // Изв. ТИНРО. 2010. Т.162. С.324–337.
18. Гаврилов Н.В., Ляпидевский В.Ю., Ляпидевская З.А. Влияние дисперсии на распространение внутренних волн в шельфовой зоне (см. ст. наст. сб.).
19. Gavrilov N., Liapidevskii V., Gavrilova K. Mass and momentum transfer by solitary internal waves in a shelf zone // Nonlin. Proc. in Geophys. 2012. V.19. P.265–272.

Статья поступила в редакцию 13.11.2012 г.

