

УДК 551.465; 551.466

ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ НА МАТЕРИКОВОМ И ОСТРОВНОМ ШЕЛЬФАХ ОТКРЫТОГО ОКЕАНА: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НА ПРИМЕРЕ НАБЛЮДЕНИЙ НА НЬЮ-ЙОРКСКОМ И ГАВАЙСКОМ ШЕЛЬФАХ

© 2010 г. В. Г. Бондур, Ю. В. Гребенюк, К. Д. Сабинин

ГУ Научный центр аэрокосмического мониторинга “Аэрокосмос” Рособразования и РАН

105064 Москва, Гороховый пер., 4

E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

E-mail: grebenyk@gmail.com

E-mail: ksabinin@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.08.2009 г., после доработки 18.01.2010 г.

На основании результатов обработки экспериментальных данных по скоростям течений и температуре воды на Атлантическом шельфе США и у Гавайских островов (о. Оаху, залив Мамала) проводится сравнительный анализ характеристик внутренних волн в этих представительных районах материкового и островного шельфов океана. Выполненные исследования показали, что поля внутренних волн в рассматриваемых районах сильно отличаются друг от друга как в низкочастотном, так и в высокочастотном диапазонах. На Атлантическом шельфе регулярно наблюдаются цуги мощных внутренних солитонов, которые отчетливо проявляются на космических изображениях поверхности океана. На островных шельфах солитоноподобные внутренние волны появляются реже в виде весьма специфических колебаний. Отсутствие поверхностных проявлений даже мощных солитонов в заливе Мамала обусловлено как большой глубиной пикноклина, так и тем, что вертикальная структура этих солитонов определяется второй, а не первой модой, как на Атлантическом шельфе.

Ключевые слова: внутренние приливы, бароклинные течения, внутренняя волна, солитон, солибор, изотерма, термоклин, когерентность, фазовая скорость.

ВВЕДЕНИЕ

Цуги солитоноподобных внутренних волн (СВВ) часто встречаются в океанах и морях, в особенности вблизи континентальных шельфов [1–4] и некоторых подводных поднятий открытого океана, таких, например, как Маскаренский хребет, Сейшельские острова и т.п. [3, 4]. Во всех этих районах СВВ отчетливо проявляются на поверхности океана в виде характерных полосчатых структур чередующихся сулоев и сликов, которые хорошо регистрируются на космических оптических и радиолокационных изображениях [1–4]. В то же время подобные цуги не замечены по их проявлениям на поверхности вблизи таких крупных неоднородностей рельефа дна, как Гавайский хребет, и других островных поднятий центральной части Тихого океана [5–7]. Пока еще не совсем ясно, связано ли это с отсутствием СВВ в этих районах или они просто не проявляются на поверхности океана из-за большой глубины термоклина. Поскольку СВВ играют важную роль в перемешивании вод океана [8], выяснение вопроса об их наличии у поднятий дна открытого океана внутри антициклонических кру-

говоротов, где термоклин глубокий, представляет большой интерес.

Основываясь на данных наблюдений на Атлантическом шельфе США у о. Лонг Айленд и у Гавайских островов (о. Оаху), мы попытались прояснить этот вопрос, сравнив фоновые условия и характеристики внутренних волн (ВВ) в этих двух представительных районах. При этом, используя данные подробных измерений колебаний течений и температуры, мы сопоставили низкочастотные ВВ (внутренние приливы и инерционные волны) как главные источники СВВ и высокочастотные ВВ, с особым вниманием относясь к цугам интенсивных волн.

1. СОПОСТАВЛЕНИЕ ФОНОВЫХ УСЛОВИЙ В РАЙОНАХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Профиль дна на Атлантическом шельфе у о. Лонг Айленд приведен на рис. 1а. На рис. 1в показано типичное распределение частоты плавучести в этом регионе. Здесь формируется две системы ВВ. Первая из них распространяется из района генерации на краю шельфа в северо-западном направлении, т.е. к берегу,

вторая система волн формируется южнее в районе каньона Гудзона и перемещается вдоль изобат.

Исследуемая акватория у о. Оаху расположена в области Гавайского хребта, где также наблюдаются интенсивная генерация внутренних приливов. Главной особенностью хребта является сверхкритическая крутизна его склонов, вследствие чего внутренние приливы генерируются здесь не над бровкой шельфа, как обычно, а на глубинах 500–1000 м [1, 5, 6, 9–17]. На рис. 1б приведен профиль дна в заливе Мамала у о. Оаху, из которой видно, что очень узкий и крутой шельф в заливе уже в 2-х км от берега переходит в очень крутой склон. Наиболее сильные полусуточные внутренние приливы в заливе Мамала связаны с удаленными источниками над порогами в проливах по обе стороны от о. Оаху.

На рис. 1в приведено типичное распределение частоты плавучести в заливе Мамала в летний период.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВНУТРЕННИХ ВОЛН

Для вычисления характеристик ВВ на Гавайском шельфе использовались результаты ежеминутных измерений профилей течений и температуры, выполненных в конце лета 2004 г. с помощью 2-х донных ADP (Bv, Cv) и 4-х заякоренных термогирлянд (ATDT), которые были установлены на краю шельфа у о. Оаху (залив Мамала) [9, 13, 18]. Измерения температуры проводились на 8-ми горизонтах в термоклине (глубины 23–72 м), а измерения течений – через каждые 2 м в слое от 4 до 76 м. Использовались также данные о плотностной стратификации, полученные с помощью микроструктурного зонда MSS [9, 13].

Для вычисления характеристик ВВ на Атлантическом шельфе использовались измерения профилей течений, выполненных с помощью донного ADCP на краю шельфа на глубине 103 м в эксперименте SWARM в 1995 г. [3]. Измерения проводились с 20 по 30 июля 1995 г. с дискретностью 1.5 минуты на 22-х горизонтах от 11 до 95 м через каждые 4 м.

Методика обработки исходных экспериментальных данных включала предварительную и специальную обработку. Предварительная обработка состояла в сглаживании массивов течений по глубине с помощью низкочастотного фильтра Баттеруорда 3-го порядка с частотой среза 100 ц/км, фильтрации по времени полосовым, низко- или высокочастотным фильтрами Баттеруорда 6-го порядка, формировании массивов данных по колебаниям глубины изотерм.

Сильно изрезанные вертикальные профили течений в заливе Мамала приобретают осмысленный вид лишь при сглаживании не менее, чем по 10 м ($F_c = 100$ ц/км). Данные измерений течений на Атлантическом шельфе с помощью ADCP (4 луча) яв-

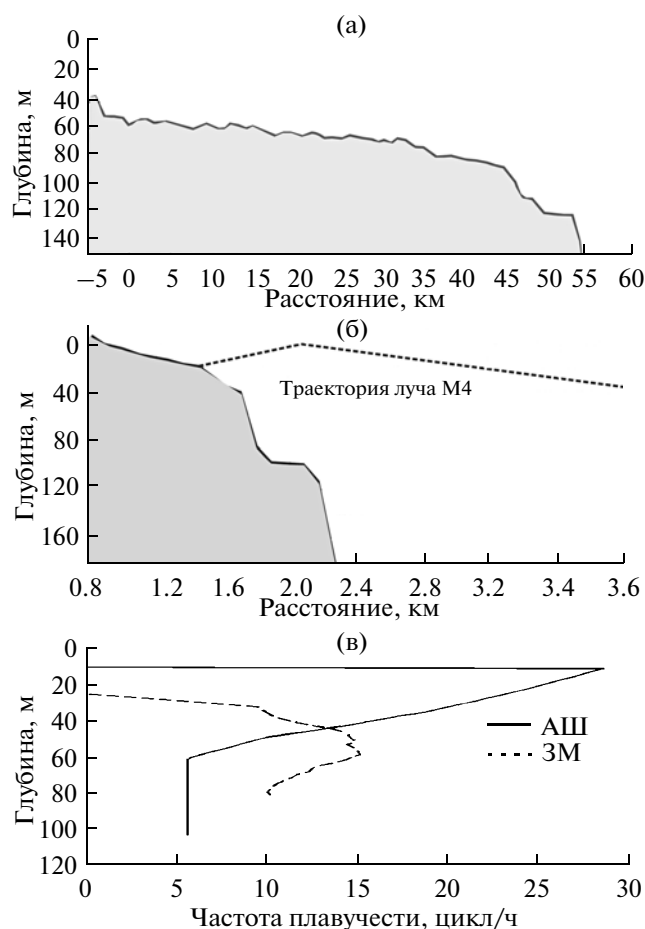


Рис. 1. Профили дна на Атлантическом шельфе (АШ) (а) и в заливе Мамала (ЗМ) (б), типичные профили частоты плавучести в этих районах (в).

ляются более точными и поэтому используются в основном без сглаживания.

При специальной обработке вычислялись следующие характеристики: составляющие течений, связанные с поверхностными и внутренними волнами, эмпирические ортогональные функции (ЭОФ), спектральные характеристики колебаний течений (в том числе спектральные инварианты и спектры по частотам и волновым числам), спектры изотерм и связь их колебаний с колебаниями течений, фазовые скорости волн.

3. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН

Имеющиеся публикации указывают на сравнительно простой характер и преимущественно локальную генерацию внутренних приливов (ВП) на Атлантическом шельфе [2–4, 7] и сложную и сильно изменчивую структуру поля ВП на Гавайском шельфе [6, 7, 10, 13], где орбитальные течения часто

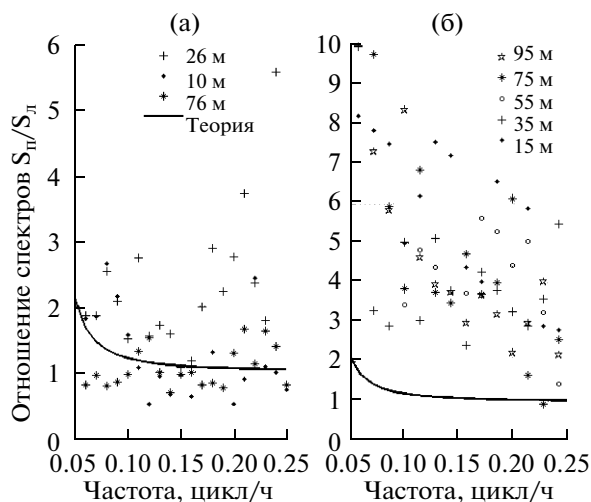


Рис. 2. Отношение спектров право- и левостороннего вращения S_p/S_l внутриволновых течений в зал. Мамала (а) и на Атлантическом шельфе (б) на разных глубинах.

обнаруживают необычный, циклонический характер вращения (против часовой стрелки).

Здесь приводятся некоторые новые результаты, полученные по часовым данным после соответствующего сглаживания по глубине и по времени. На рис. 2 приведены графики отношения спектров право- и левостороннего вращения внутриволновых течений в заливе Мамала и на Атлантическом шельфе. Анализ рис. 2 показывает, что в заливе Мамала в нижнем слое доминирует левостороннее (циклоническое) вращение на приливных частотах, тогда как на Атлантическом шельфе вращение везде правильное (антициклоническое), хотя орбиты утолщены из-за неустойчивости направлений. Однако отношение вращательных компонент и на Атлантическом шельфе значительно выше теоретического (жирная линия на рис. 2), которое должно быть в волнах Свердрупса.

Заметим, что здесь, как и везде в этом пункте, внутриволновые движения выделялись из общего поля вычитанием нулевой моды ЭОФ, которая и характеризует поле течений поверхностного прилива в исследуемом районе. Простое вычитание средних по вертикали течений, как это обычно делается, дает бароклинную составляющую поля, которая включает в себя и течения поверхностного прилива вблизи резких неоднородностей рельефа дна [11].

Сопоставим теперь частотные спектры внутриволновых течений в исследуемых районах, различая волны, энергия которых идет вверх (восходящие ВВ) и вниз (нисходящие ВВ). Это достигается путем суммирования спектральной плотности в соответствующих квадрантах двумерных спектров по частоте и вертикальному волновому числу с применением метода Вентцеля, Крамерса, Бриллюэна

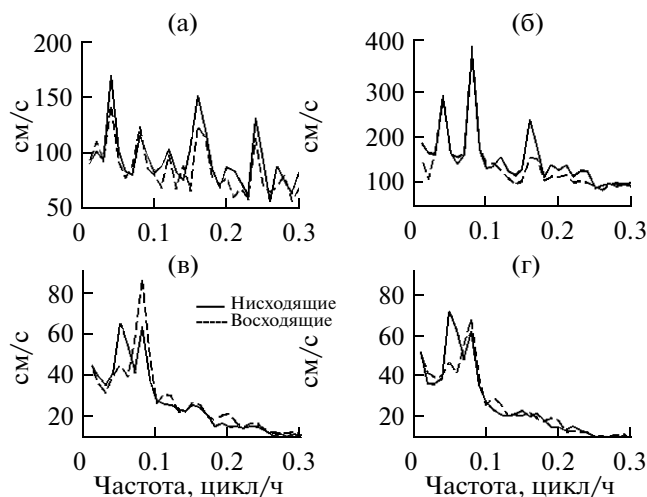


Рис. 3. Сопоставление спектров течений нисходящих и восходящих поперечных (а, в) и продольных (б, г) внутренних волн в заливе Мамала (а, б) и на Атлантическом шельфе (в, г).

(ВКБ) — трансформации оси глубин [19]. На рис. 3 дано сопоставление одномерных спектров в заливе Мамала и на Атлантическом шельфе.

Расчеты таких спектров для различающихся по вертикальному направлению волн показали, что в заливе Мамала продольные течения принадлежат в основном к ВВ М2 низшей моды. Поперечные течения в заливе Мамала связаны с ВВ М4 при явном преобладании идущих вниз волн, а также заметной роли 4-часовых волн. В спектрах присутствуют и суточные волны с симметричным вертикальным спектром продольных течений, но с преобладанием идущих вниз волн в поле поперечных течений. Вообще, спектры поперечных течений сложнее продольных. В спектрах поперечных течений 6-ти и 4-х часовые гармоники сильнее полусуточных М2, содержат более высокие моды и относительно симметричны, но с преобладанием движения энергии вниз.

Из рис. 3 видно, что по сравнению с заливом Мамала такие спектры для Атлантического шельфа гораздо проще и слабее. На приливных частотах Атлантического шельфа присутствуют только полусуточные волны М2. При этом спектр продольных волн М2, в отличие от инерционных колебаний, почти симметричен по вертикали. Это говорит о некоторой удаленности источника волн, достаточной для формирования стоячих по вертикали мод. Как предполагается в [3], генерация ВВ происходит южнее от места наблюдений. Спектр поперечных волн М2, напротив, асимметричен, причем преобладает движение вверх, присущее лучевому распространению от источника, расположенного неподалеку от места наблюдений. На инерционной частоте доминируют нисходящие волны.

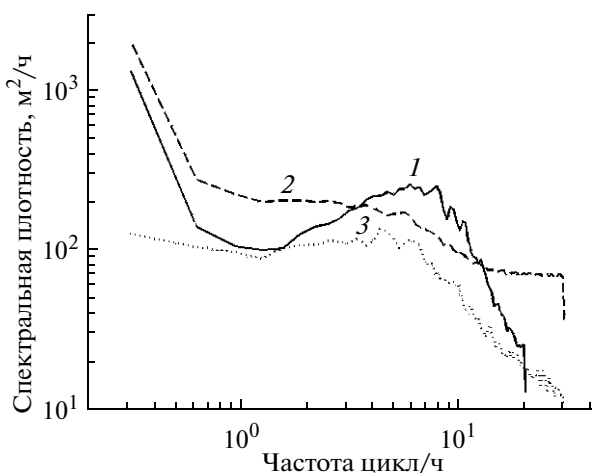


Рис. 4. Спектры вертикальных скоростей, измеренных на Атлантическом шельфе (кривая 1) и в заливе Мамала (кривая 2); кривая 3 – спектр вертикальных скоростей в заливе, оцененных по колебаниям центральной изотермы пикноклина.

В поперечных волнах залива Мамала доминируют нисходящие суточные, 6-ти часовые (М4) и 4-х часовые (М6) волны при слабой выраженности полусуточных (М2) и отсутствии инерционных (0.03 цикл/ч) волн. Асимметрия спектров указывает на локальную генерацию соответствующих волн. Хорошо выраженные суточные и полусуточные продольные колебания обладают симметричным спектром, что согласуется с их нелокальной генерацией [11], но в 6-ти часовых волнах доминируют

нисходящие компоненты, которые возбуждаются неподалеку от места наблюдений.

Поскольку в заливе Мамала в полусуточных приливах доминируют волны, приходящие от удаленных источников над порогами у о. Оаху [14–17], преобладание продольных колебаний и симметричность спектра по вертикали (низшая мода) вполне ожидаемы. Асимметрия и значительное преобладание в спектре поперечных колебаний М4 при слабой выраженности М2 указывает на локальную генерацию шестичасовых волн. Это вполне объяснимо, т.к. генерация 6-ти часовых ВВ в районе становится возможной, поскольку для волн М4 наклон шельфа в заливе совпадает с наклоном луча, тогда как для волн М2 подобного критического наклона у края шельфа нет (см. рис. 16).

Вычисления уровня когерентности между колебаниями центральной изотермы пикноклина и проекцией бароклинных течений на различные направления подтверждают этот вывод. При колебаниях скорости поперек изобат максимум когерентности для ВВ М4 равен 0.80 при разности фаз 75°. Для поперечных колебаний на ВВ М2 когерентность несколько ниже (0.67) при разности фаз 66°. Кроме того, смещения изотермы и горизонтальные скорости явно связаны, причем скорость опережает смещения на 75°, что является еще одним подтверждением локальной генерации волн М4. В наклонной волне с энергией, идущей вниз и от берега (как и у идущей вверх и к берегу), разность фаз должна быть 90°, что близко к измеренной разности.

Вычисление двумерного спектра волн дает общее для всего слоя преобладание движения энер-

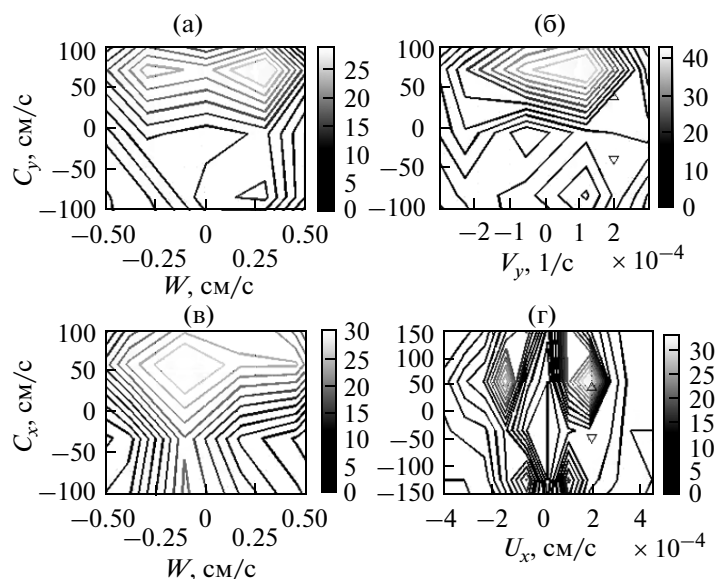


Рис. 5. Гистограммы фазовых скоростей C_y , C_x и W (а, в), горизонтальной дивергенции течений V_y , U_x (б, г) для 15-минутных поперечных волн (а, б) и 10-минутных продольных (в, г) на Атлантическом шельфе.

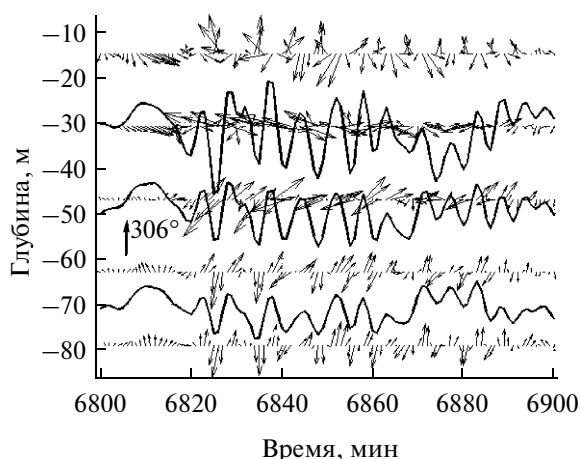


Рис. 6. Горизонтальные бароклинные течения (стрелки) и смещения слоев (линии), оцененные интегрированием вертикальных скоростей (в диапазоне частот от 0.5 до 10 ц/ч) в цуге солитонов, прошедших над краем шельфа (точка *D* эксперимента SWARM-95, глубина 103 м, направление на берег 306°). Дискретность по времени 1.5 мин.

гии 6-ти часовых волн вниз, т.е. волна M4 идет от прибрежной части шельфа преимущественно вниз и в открытый океан. Волна излучается в районе 1.3–1.5 км от берега, где наклон шельфа близок к критическому для ВВ M4 (рис. 16). Какая-то часть энергии излучается и вверх, причем соответствующая характеристика (ядро луча) касается поверхности океана в ~2 км от берега.

4. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН

Как уже отмечалось во введении, основным отличием исследуемых районов является наличие солитонов на Атлантическом шельфе, которые почти незаметны в заливе Мамала. Ниже будут рассмотрены как спектральные характеристики короткопериодных внутренних волн (КПВВ), так и отдельные цуги.

4.1. Спектральные характеристики КПВВ

Спектральные характеристики КПВВ в заливе Мамала подробно описаны в статье [12], ниже приводятся некоторые основные результаты. На рис. 4 изображены спектры вертикальных скоростей, вычисленные по данным измерений на Атлантическом шельфе и в заливе Мамала.

В спектре скоростей на Атлантическом шельфе наблюдаются пики, связанные с цугами солитонов, которые плохо выделяются в заливе Мамала. Мощный высокочастотный пик на спектре Атлантического шельфа хуже выделяется в заливе Мамала даже по колебаниям изотермы. Стабильность и узость

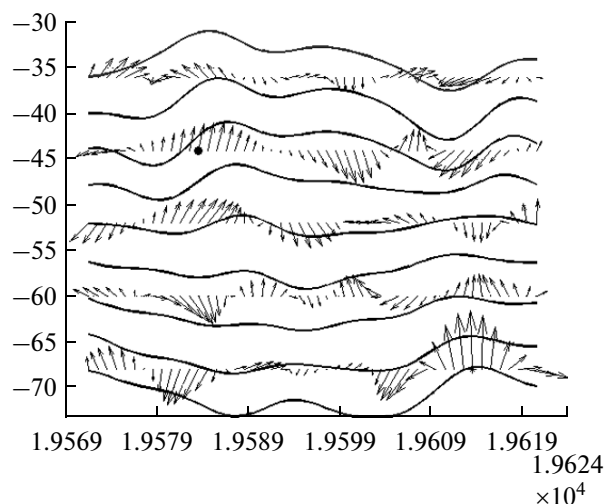


Рис. 7. Оценка фазовой скорости волны, идущей поперек изобат, по измерениям в заливе Мамала (станция Вv) на 19585-ой минуте наблюдений в слое 47–55 м. Стрелки обозначают направления горизонтальных бароклинных течений, линии – смещения слоев, оцененные интегрированием вертикальных скоростей (в диапазоне частот от 0.5 до 10 цикл/ч) в цуге солитонов.

эллипсов ВВ на Атлантическом шельфе существенно выше. Однако и на Атлантическом шельфе волны (цуги солитонов) распространяются не только нормально к изобатам, о чем говорит “пухлость” эллипсов и угол 20°–30° между направлением эллипсов и изобатами. Это указывает на наличие второго источника, находящегося к юго-востоку от места измерений. Наиболее стабильные и узкие эллипсы на Атлантическом шельфе наблюдаются в полосе 4–10 ц/ч, тогда как в заливе Мамала – в полосе 2–4 ц/ч, где эллипсы направлены поперек изобат, но их большая толщина и меньшая стабильность говорят о большей неустойчивости направлений.

Сопоставим фазовые скорости доминирующих волн на Атлантическом шельфе и в заливе Мамала, применив предложенный в [20, 21] метод, основанный на использовании уравнения неразрывности для двумерного случая. Метод состоит в следующем. Если, например, волна с произвольным гладким профилем распространяется вдоль оси Oy с фазовой скоростью C_y , то ее орбитальная скорость на некотором горизонте будет $V(t, y) = V(p)$, где $p = (y - C_y \times t)$, t – время. Дифференцируя V по правилу сложной функции имеем:

$$dV/dt = -dV/dp \times C_y, \quad dV/dy = dV/dp.$$

Отсюда $dV/dy = -(dV/dt)/C_y$, что в силу уравнения неразрывности $dV/dy = -dW/dz$ дает $C_y = (dV/dt)/(dW/dz)$, где W и z – вертикальные скорость и направление.

Легко распространить этот метод и на случай синусоидальной волны.

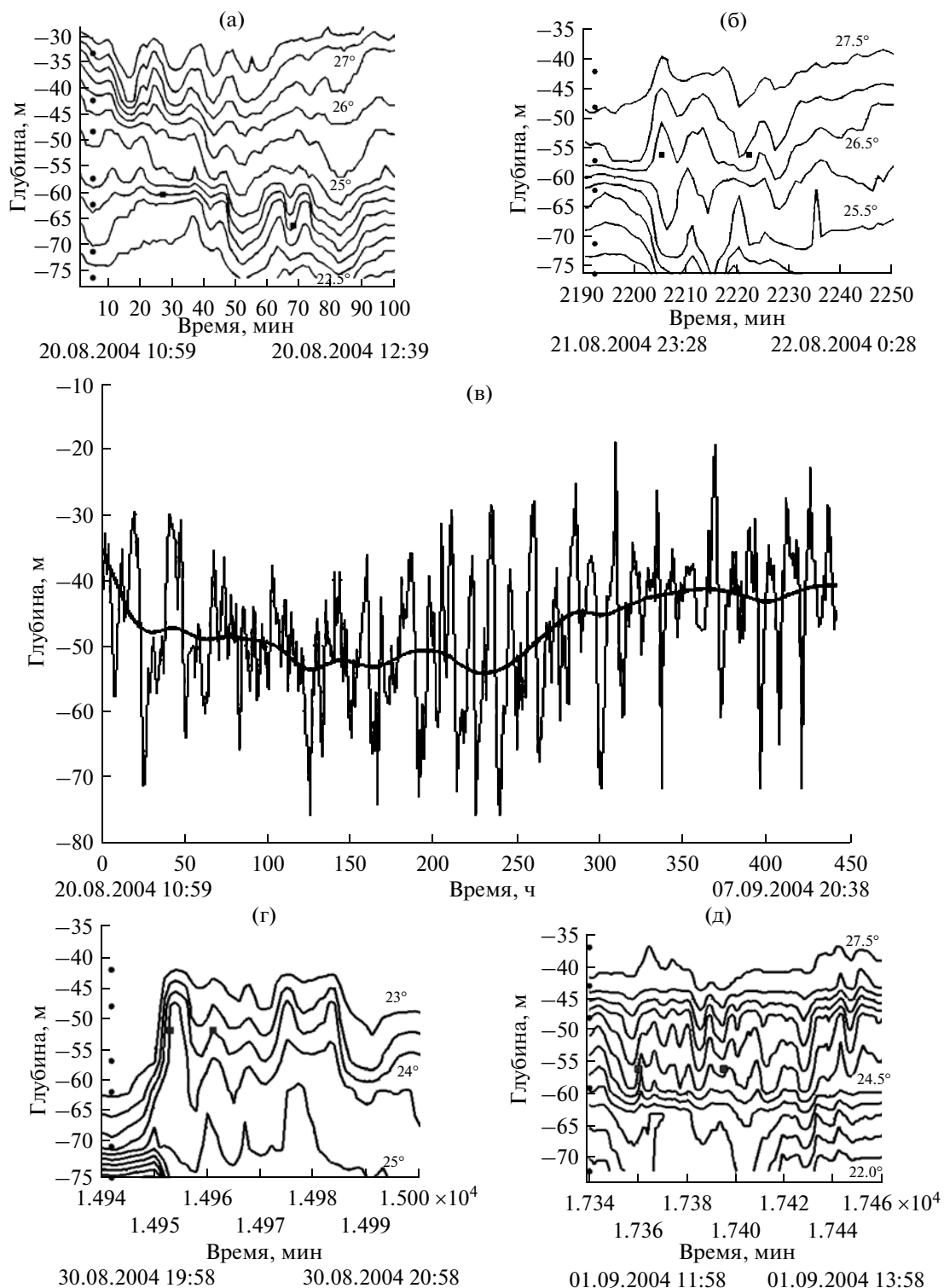


Рис. 8. Колебания изотерм в хорошо выраженных пугах КПВВ (а–д) на фоне низкочастотных колебаний термоклина (в) в заливе Мамала : а – 20.08.2004 10:59–12:39; б – 21.08.2004 23:28–22.08.2004 0:28; г – 30.08.04 19:58–20:58; д – 01.09.2004 11:58–13:58; в – толстой линией показаны колебания, сглаженные фильтром <0.5 цикл/ч.

Средний по глубине спектр бароклинных течений, вычисленный по данным измерений на Атлантическом шельфе, дает пик на частоте 4 ц/ч для направленной поперек изобат составляющей V и пики вблизи 6 ц/ч для направленных вдоль изобат составляющих U и W . Связывая спектральный пик V (4 ц/ч) с поперечными волнами, а пик U (6 ц/ч) — с продольными волнами, мы оценили фазовую скорость C_y в узкой полосе частот вокруг 4 ц/ч и скорость C_x — в полосе вокруг 6 ц/ч. Оценка скоростей проводилась в тех точках записи, где сигналы были сильны, а помехи незначительны, т.е. при больших градиентах вертикальной скорости dWz , но слабых сдвигах фоновых течений, при больших Vt и слабых Ut (Vt и Ut — производные скоростей) при оценивании C_y , и наоборот — при оценивании C_x .

В слое 47–65 м было проведено 269 оценок для фазовой скорости C_y и 360 для C_x . Общая картина фазовых скоростей и соответствующих параметров орбитальных течений W и горизонтальной дивергенции течений дана на трехмерных диаграммах рис. 5.

Из анализа гистограмм, приведенных на рис. 5, видно, что преобладали волны со скоростями около 0.7 м/с, которые соответствуют скоростям солитонов. В заливе Мамала скорости КПВВ были меньше, что связано со слабым развитием солитонов [12].

4.2. Цуги короткопериодных внутренних волн

Цуги короткопериодных ВВ на Атлантическом шельфе. Хорошо известно (см., например, [2, 3, 7]), что на Атлантическом шельфе систематически появляются цуги интенсивных внутренних солитонов, подобные изображенным на рис. 6.

Для оценки фазовой скорости отдельных волн выбирались горизонты и моменты, когда сигналы Vt и dWz были сильны, а сдвиговое загрязнение фоновыми течениями незначительно.

Цуги короткопериодных ВВ в заливе Мамала. По результатам сопоставлений колебаний течений и изотерм установлено, что для анализа отдельных цугов в Мамале требуется более сильное сглаживание данных ADP. Только после сглаживания течений по 20 м по глубине и низкочастотной (ниже 6 ц/ч) фильтрации удалось достичь некоторого подобия вертикальных движений изотерм и колебаний слоев, оцененных с помощью интегрирования вертикальных течений. Полного подобия, впрочем, ожидать нельзя, т.к. оценивание колебаний термоклина по вертикальной скорости (Эйлерово описание) отличается от Лагранжева слежения за изотермой.

Для оценки фазовой скорости волны, идущей поперек изобат на станции Вv, была выбрана точка в записи течений на 19585-й минуте наблюдений в слое 47–58 м, где все необходимые для оценивания величины были достаточно велики (рис. 7). В выбранном слое скорости фоновых течений, которые

могут исказить данные из-за “сдвигового загрязнения” [22], были небольшими. Расчеты показали, что волна движется в океан со скоростью 37 см/с, что ниже ожидаемой скорости солитонов, а изменение колебаний с глубиной указывает на присутствии высших мод.

В другом цуге на 213-м часе наблюдений форма колебаний изотермы 27°C похожа на придонные солитоны, но оценка колебаний слоев и течений в полосе 0.5–6 ц/ч по данным ADP указывает на многомодовость волн. Хотя оценки скорости идущих поперек изобат волн в цуге различаются, но обе дают направление к берегу. В этом цуге были большие волны с периодом 20–40 мин не нижней моды, идущие к берегу с фазовой скоростью $C = 0.2–0.5$ м/с. Несмотря на форму колебаний изотермы, напоминающей придонные солитоны (солитоны возвышения), характер поля течений и колебаний слоев, оцененных по ADP, противоречит солитонной интерпретации природы этого цуга.

Проведенные оценки колебаний слоев по вертикальной скорости и по изотермам в цугах КПВВ достаточно хорошо согласуются и указывают на доминирование волн преимущественно нижней моды, но явных признаков солитонов нет. Об этом говорит и неопределенная форма колебаний и небольшие фазовые скорости волн, идущих поперек изобат. Нужно также заметить, что из-за сильного сглаживания течений по глубине (по 20 м) и больших расстояний между термисторами (5–10 м) проявления высоких мод подавляются. Колебания термоклина в цугах КПВВ, хорошо выраженных в колебаниях изотерм и в поле течений, представлены на рис. 8а–8д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате сравнительного анализа измерений колебаний течений и температуры на краю шельфа в заливе Мамала и на Атлантическом шельфе у о. Лонг Айленд изучены основные особенности и различия полей ВВ в этих репрезентативных районах.

В отличие от материкового Атлантического шельфа, где в приливном диапазоне частот доминируют возбуждаемые на краю шельфа полусуточные ВП, на островном шельфе в заливе Мамала преобладают волны не-локального происхождения и кроме полусуточных хорошо выражены четвертьсуточные ВП. Локальная генерация полусуточных ВП в заливе Мамала ослаблена из-за большой крутизны шельфа, но может происходить эпизодически при возникновении благоприятной стратификации плотности и течений. В то же время четвертьсуточные ВП могут генерироваться регулярно, поскольку наклон их лучей близок к наклону шельфа в заливе. В пользу локальной генерации четвертьсуточных ВП свидетельствует асимметрия вертикальных спектров течений. В заливе Мамала заметны также и суточные ВВ, но почти не выделяются инерционные колебания, тогда как

на Атлантическом шельфе инерционные волны не только хорошо выражены, но и существенно влияют на генерацию внутренних солитонов [7].

Регулярно (чаще всего, дважды в сутки) на Атлантическом шельфе у о. Лонг Айленд появляются мощные ВС в виде цугов и/или солиборов низшей моды [2, 3], тогда как в заливе Мамала солитоноподобные ВВ появляются реже и в виде весьма специфических колебаний, которые напоминают солиборы, но с отличающейся от солиборов Атлантического шельфа вертикальной структурой. И если в солиборах Атлантического шельфа резкий скачок пикноклина сопровождается цугом квазисинусоидальных линейных волн, то в солиборах залива Мамала передний фронт имеет вид ступенек разного знака в верхней и нижней частях пикноклина (вторая мода!), а осциллирующий “хвост” выражен менее четко и обнаруживает признаки существования как второй, так и первой мод.

Амплитуда скачков пикноклина превышает 10 м, а скорость их распространения близка к фазовой скорости низкочастотных ВВ второй моды, как это и должно быть в солитонах. Слабое различие скоростей высокочастотных волн в “хвосте” говорит либо об их низкомодовой структуре, либо о том, что и эти волны тоже являются солитонами.

Вообще говоря, по измерениям на одной вертикали трудно отличить солибор от зарождающегося цуга солитонов, поскольку в последнем за резким фронтом лидирующего солитона тоже следуют квазипериодические колебания, являющиеся, по сути, вершинками солитонов, расположенных близко друг от друга и разбегающихся впоследствии из-за амплитудной дисперсии [19].

Записи цугов в заливе Мамала показывают, что часть следующих за крутым фронтом колебаний тоже связана с солитонами второй моды. Более слабые колебания в “хвосте” цугов являются линейными волнами низшей моды, не отстающими от солитонов в силу того, что их скорость близка к скорости распространения солитонов второй моды.

Полярность ступенек в этих своеобразных цугах, которые можно условно назвать солиборами второй моды, зависит от глубины пикноклина, верхняя часть которого испытывает провалы при высоком его положении и всплески — при низком (рис. 8). Преимущественное возбуждение в заливе Мамала второй моды, а не первой, как на Атлантическом шельфе, объясняется недостаточной скоростью потоков, генерирующих цуги солитонов.

Таким образом, поля ВВ в рассматриваемых районах сильно отличаются как в низкочастотном, так и в высокочастотном диапазонах. И хотя в заливе Мамала тоже возникают значительные солитоны, их характер, а также частота возникновения (спорадическая и относительно редкая) сильно отличается от характеристик солитонов на Атлантическом шельфе. Отсутствие поверхностных проявлений даже мощ-

ных ВС на островном шельфе в заливе Мамала объясняется не только большой глубиной пикноклина, но и тем, что вертикальная структура наиболее заметных солитонов определяется второй модой (а не первой модой, как на Атлантическом шельфе). Эпизодическое появление сильных ВС в заливе Мамала связано с редким возникновением сильных поперек-склоновых течений ВП, существенных для генерации ВС. Во ВП залива Мамала преобладают вдоль-склоновые орбитальные движения [12].

Можно предполагать, что характерные специфические черты поля ВВ, выявленные в заливе Мамала, присущи и другим островным грядам открытого океана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы в современной океанологии // Новые идеи в океанологии. Т. 1. М.: Наука, 2004. 352с.
2. *Бондур В.Г., Морозов Е.Г., Бельчанский Г.И. и др.* Радиолокационная съемка и численное моделирование внутренних приливных волн в шельфовой зоне // Исследование Земли из космоса. № 2. 2006. С. 51–63.
3. *Apel J.R., M. Badiey, J. Berson et al.* An overview of the 1995 SWARM shallow-water internal wave acoustic scattering experiment // IEEE J. Ocean. Engin. 1997. V. 22. № 3. P. 465–500.
4. *Jackson C.R., Apel J.R.* An atlas of internal solitary-like waves and their properties // Global Ocean Associates. May. 2002.
5. *Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Морозов Е.Г.* Регистрация из космоса и моделирование коротких внутренних волн в прибрежных зонах океана // ДАН. 2008. Т. 418. № 4. С. 1–6.
6. *Бондур В.Г., Замшина А.Ш.* Исследование высокочастотных внутренних волн на границе шельфа по спектрам космических оптических изображений // Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 1. С. 1–19.
7. *Sabinin K.D., Serebryany A.N.* Intense short-period internal waves in the ocean // J. Marine Res. 2005. V. 63. № 1. P. 227–261.
8. *Munk W., Wunsch C.* Abyssal recipes II: energetics of tidal and wind mixing // Deep-Sea Res. 1998. V. 45. P. 1977–2010.
9. *Bondur V.G.* Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas // Proc. of 31st Int. Symp. on Remote Sensing of Environment. St.Petersburg: Plenary presentation, 2005. P. 1–6.
10. *Бондур В.Г., Сабинин К.Д., Гребенюк Ю.В.* Изменчивость внутренних приливов на шельфе о. Оаху (Гавайи) / Океанология. 2008. Т. 48. № 4. С. 1–11.
11. *Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д.* Особенности генерации внутренних приливов у о. Оаху (Гавайи) // Океанология. 2009. Т. 49. № 3. С. 325–336.
12. *Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д.* Спектральные характеристики и кинематика короткопериодных внутренних волн на Гавайском шельфе //

- Изв. РАН. Физика атмосферы океана. 2009. Т. 45. № 5. С. 641–651.
13. Бондур В.Г., Филатов Н.Н., Гребенюк Ю.В. и др. Исследование гидрофизических процессов при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории (на примере бухты Мамала, о. Оаху, Гавайи) // *Океанология*. 2007. Т. 47. № 6. С. 827–846.
 14. Alford M.H., Gregg M.C., Merrifield M.A. Structure, Propagation and Mixing of Energetic Baroclinic Tides in Mamala Bay // *J. Phys. Oceanogr.* 2006. V. 36. № 6. P. 997–1018.
 15. Merrifield M.A., Alford M.H. Structure and variability of semidiurnal internal tides in Mamala Bay, Hawaii // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. № 5. C05010. doi: 10.1029/2003JC002049.
 16. Merrifield M.A., Holloway P.E. Model estimates of M2 internal tide energetics at the Hawaiian Ridge // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № C8. P. 3179, doi: 10.1029/2001JC000996
 17. Merrifield M.A., Holloway P.E., Johnston M.S. The generation of internal tides at the Hawaiian Ridge // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. № 4. P. 559–562.
 18. Bondur V.G., Filatov N.N. Study of physical processes in coastal zone for detecting anthropogenic impact by means of remote sensing // *Proc. of the 7 Workshop on Physical processes in natural waters, Petrozavodsk, Russia, 2003*. P. 98–103.
 19. Коняев К.В., Сабинин К.Д. Волны внутри океана. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 272 с.
 20. Sabinin K. Divergence and filamentation of the sea currents at the shelf edge // *Abstracts. Int. Conf. "Fluxes and Structures in Fluids"*. St.-Petersburg, 2007. P. 100–101.
 21. Sabinin K., Paka V. Internal solitons in the sea experimental data // *US-EU Baltic 2008 Int. Symposium, May 27–29, 2008, Tallinn, Estonia*. (16 с. Опубликовано на CD симпозиума).
 22. Сабинин К.Д. О сдвиговом искажении данных по орбитальным скоростям во внутренних волнах // *Океанология*. 1976. Т. 16. № 3. С. 397–402.

Internal Waves on Continental and Island Shelves of the Open Ocean: A Comparative Analysis for Observations on the New York and Hawaii Shelves

V. G. Bondur^a, Yu. V. Grebenyuk^a, and K. D. Sabinin^b

^a *Aerocosmos Scientific Center of Aerospace Monitoring, Gorokhovskii per. 4, Moscow, 105064 Russia*

e-mail: vgbondur@aerocosmos.info

e-mail: grebenyk@gmail.com

^b *Institute for Space Research, Russian Academy of Sciences, ul. Profsoyuznaya 84/32, Moscow, 117810 Russia*

e-mail: ksabinin@yandex.ru

Received August 12, 2009; in final form, January 18, 2010

Abstract—Based on the results of processing experimental data obtained from measurements of current velocities and water temperatures on the United States Atlantic Shelf and near the Hawaii Islands (the island of Oahu and Mamala Bay), we perform a comparative analysis of the characteristics of internal waves in these representative areas of continental and island shelves of the ocean. These investigations indicate that the internal-wave fields in these areas are very different from one another in both the low- and high-frequency ranges. On the Atlantic Shelf, we have regularly observed tandems of powerful internal solitons clearly seen on space imagery of the oceanic surface. On the island shelves, soliton-type internal waves were less seldom seen as very specific oscillations. The absence of surface manifestations of even powerful solitons in Mamala Bay is explained both by the large pycnocline depth and by the fact that the vertical structure of these solitons is controlled by the second rather than the first mode, as it is on the Atlantic Shelf.

Keywords: internal waves, baroclinic currents, internal wave, soliton, isotherm, thermocline, coherence, phase velocity.