

УДК 551.465,551.466

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВНУТРЕННИХ ПРИЛИВОВ В ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ ОСТРОВА ОАХУ (ГАВАЙИ)

© 2008 г. В. Г. Бондур¹, Ю. В. Гребенюк¹, К. Д. Сабинин²¹Научный центр аэрокосмического мониторинга “Аэрокосмос”, Москва
e-mail: vgbondur@online.ru²Институт космических исследований РАН, Москва

Поступила в редакцию 06.02.2007 г., после доработки 16.07.2007 г.

На основе анализа данных о колебаниях скоростей течений и температуры, полученных с помощью донных профилографов течений ADCP и заякоренных термогирлянд в экспериментах, проведенных в акватории б. Мамала (о. Оаху, Гавайи), исследуются вариации характеристик полусуточного внутреннего прилива. Установлено, что величина, форма и ориентация орбит, а также направление вращения орбитальных течений внутреннего прилива испытывают сильную пространственно-временную изменчивость. При этом формы орбит и направления вращения орбитальных течений лишь изредка приобретают черты, свойственные прогрессивным внутренним волнам на вращающейся Земле. Предполагается, что такие необычные свойства орбитальных течений связаны с интерференцией волн, которые приходят из проливов, окаймляющих о. Оаху, а также с волнами, эпизодически локально генерируемыми на краю шельфа зал. Мамала при возникновении благоприятных для этого условий. В среднем локальная генерация малоэффективна из-за того, что наклон шельфа в заливе сверхкритичен для полусуточных внутренних приливов.

ВВЕДЕНИЕ

Основным генератором энергии для перемешивания вод стратифицированного океана являются внутренние приливы (ВП), возбуждаемые над неровностями дна [17]. Исследуемая акватория расположена в области Гавайского хребта с его крутыми склонами, которая является одним из районов наиболее интенсивной генерации ВП. По этой причине именно здесь проводились обширные измерения ВП по программе НОМЕ [5, 12, 15, 16]. Однако, несмотря на интенсивное изучение ВП по этой программе, а также в более ранних экспериментах [18], многое остается пока еще неясным из-за крайней сложности поля внутреннего прилива у Гавайского хребта вообще и, в особенности, в зал. Мамала у о. Оаху (рис. 1). Главным отличием этого хребта является сверхкритическая (для доминирующих здесь полусуточных волн) крутизна его склонов, вследствие чего внутренние приливы генерируются, как правило, на значительных глубинах.

Учитывая, что для средней плотностной стратификации наклон дна у края шельфа в заливе сверхкритичен, считается, что ВП генерируются здесь не над бровкой шельфа, как обычно, а на глубинах 500–1000 м, где лучи полусуточного внутреннего прилива (в дальнейшем будем обозначать эти волны – ВВМ2) из-за уменьшающейся стратификации становятся круче, совпадая с наклоном дна. С этих глубин критического наклона и происходит излучение ВВМ2, но только в открытый океан, т.к.

вверх по склону наклон дна становится больше наклона лучей.

Тем не менее, на краю шельфа зал. Мамала наблюдаются значительные ВВМ2, которые в имеющихся публикациях [5, 12, 15, 16] связываются с удаленными источниками над порогами в проливах по обе стороны от о. Оаху.

Приходя в залив, эти волны формируют сложное интерференционное поле, меняющееся не только в пространстве, но и во времени из-за изменения фоновых условий. В частности, как будет показано ниже, наблюдаемое циклоническое вращение течений ВП в заливе (отмеченное в [18] и оставшееся без объяснения) может быть следствием подобной интерференции волн, так же как и сильная изменчивость орбит течений, лишь изредка напоминающих орбиты в волнах Свердрупа. По аналогии с поверхностными приливами мы будем так называть свободные внутренние волны, в которых частицы воды вращаются антициклонически по орбитам, имеющим форму эллипсов с соотношениями осей, равными отношениям локальных инерционных частот к частотам волн.

Помимо свойственных приливам полумесячных вариаций ВП, изученных в [12], наблюдается изменчивость и в других временных масштабах, что может быть связано с изменчивостью частоты плавуности и течений как в местах генерации волн, так и по пути их распространения к месту измерений [15].

Несмотря на основательность большого числа экспериментов, выполненных в акваториях у

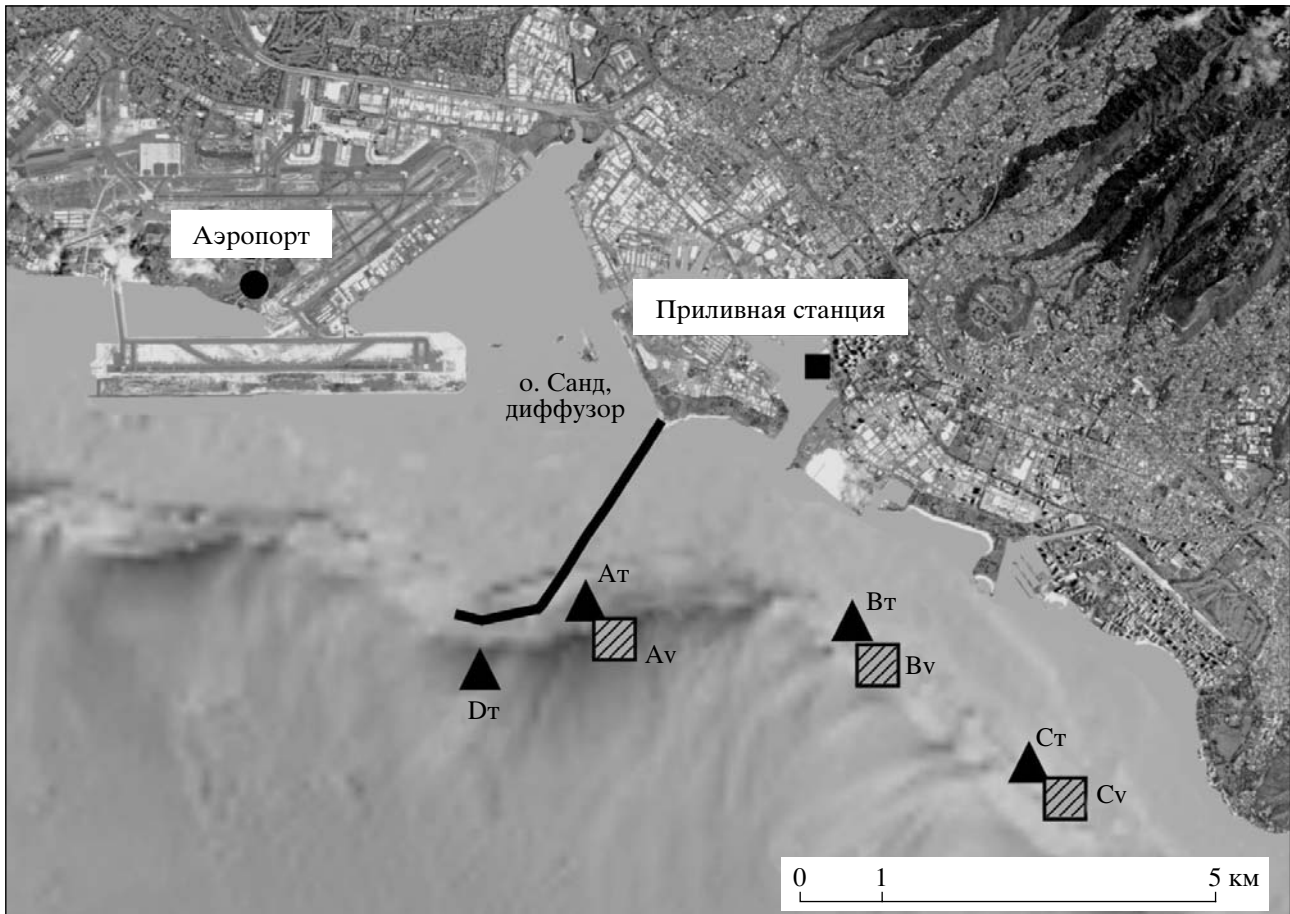


Рис. 1. Карта о-ва Оаху с указанием расположения измерительных станций в б. Мамала.

о. Оаху, и тщательный анализ полученных данных и результатов численного моделирования, вне внимания исследователей осталась возможность локальной генерации ВВМ2 на кромке шельфа в самом зал. Мамала, которая может возникать из-за сильной изменчивости локальной стратификации и течений в данном районе.

Опираясь на полученные в августе–сентябре 2002–2004 гг. данные измерений колебаний течений и температуры на шельфе зал. Мамала [1, 2, 7, 8, 10, 11, 14], мы изучили особенности относительно мелкомасштабной изменчивости ВП, остававшиеся до сих пор вне внимания исследователей.

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для исследования характеристик приливных внутренних волн на шельфе у о. Оаху использовались результаты гидрофизических измерений, выполненных в акватории зал. Мамала в 2002–2004 гг. в процессе исследований антропогенных воздействий на экосистемы прибрежных акваторий [1, 2, 3,

7–10, 11, 13, 14]. При проведении этих комплексных исследований выполнялась съемка прибрежной акватории с космических аппаратов, а также подспутниковые измерения гидрофизических, биологических и химических характеристик среды [1, 7].

Измерения гидрофизических характеристик среды проводились с помощью ряда стационарных станций, оборудованных термогирляндами и акустическими измерителями течений (ADCP), с борта судов датчиками STD и ХВТ, опускаемых и буксируемых микроструктурных зондов (MSS) [7, 8, 10, 13]. На рис. 1 показано расположение установленных в бухте стационарных станций, на которых в течение 2–3 недель проводились измерения вертикальных профилей температуры (станции Ат, Вт, Ст, Dt) и 3-х составляющих вектора течений (станции Ав, Вв, Св). В дальнейшем изложении проведения эксперимента год проведения измерений на станциях (2003, 2004) обозначается цифрами 3 или 4 соответственно, стоящими после буквенных обозначений станции. При проведении измерений термисторные цепочки и ADCP располагались рядом.

Из рис. 1 видно, что измерения температуры и течений проводились в 3-х областях б. Мамала: не-

Сведения об измерениях гидрофизических параметров в б. Мамала в 2003–2004 гг.

Год	2003		2004		2003		2004	
Акустические доплеровские профилографы	Av		Bv		Cv			
Время измерения	31.08–22.09	–	31.08–22.09	20.08–08.09	31.08–22.09	23.08–08.09	–	
Дискретность отсчетов, мин	1	–	1	1	1	1	–	
Глубины, м	4.5–71.5	–	4.5–76.5	4.5–76.5	4.5–76.5	4.5–76.5	–	
Термогирлянды	At		Bt		Ct		Dt	
Время измерения	27.08–22.09	14.08–07.09	31.08–22.09	18.08–07.09	31.08–22.09	20.08–08.09	23.08–07.09	
Дискретность отсчетов, мин	5	0.5	2	0.5	2	0.5	0.5	
Количество горизонтов	15	8	7	8	6	8	18	
Глубины, м	3.5–45.5	17–80	22–66	19–76	20–62	21–70	23–172	

посредственно около диффузора сбросового устройства (станции А, D), на удалении ~3.5 км к востоку от диффузора (станции Bt, Bv) и в 7 км к юго-востоку от него (станции Ct, Cv). На стационарных станциях течения измерялись в диапазоне глубин от 3.5 м до 75.5 м с дискретностью по глубине 2 м и по времени 1 мин. Измерения температуры воды проводились на разных горизонтах от 3–18 м до 45–76 м с дискретностью 2–5 мин в 2003 г. и 30 сек в 2004 г. [7, 10].

В таблице приведены сведения об этих измерениях. Накопленные данные с учетом дискретности и длительности измерений позволяют исследовать изменчивость гидрофизических характеристик в б. Мамала в масштабах от нескольких минут до 20 суток.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Методика включала предварительную и специальную обработку экспериментальных данных. Предварительная обработка состояла из следующих операций:

- формирование массивов данных по результатам измерений температуры (T) и скоростей течений (U , V) на станциях А, В, С;
- удаление “сбойных” отсчетов;
- сглаживание (низкочастотная фильтрация) массивов (с целью уменьшения ошибок измерений) с последующим увеличением временной дискретности до 1 часа;
- формирование массивов данных по глубинам залегания изотерм на основе результатов измерения температуры воды на нескольких горизонтах (от 6 до 18).

Для сглаживания временных рядов применялся фильтр Баттеруорда 6-го порядка с частотой среза 2 цикл/час. Для сглаживания по глубине применялся фильтр Баттеруорда 4-го порядка с частотой среза 0.5 цикл/метр.

При специальной обработке для анализа внутренних приливов по данным обработки профилей температуры и скоростей течений вычислялись следующие характеристики:

- баротропные (средние по вертикали) и бароклинные (после вычитания баротропных) составляющие течений U , V ;
- составляющие бароклинных и баротропных течений в частотном диапазоне полусуточного прилива M2 (полосовой фильтр Баттеруорда 6-го порядка в полосе от 0.07 до 0.09 цикл/час);
- составляющие смещений изотерм в частотном диапазоне полусуточного прилива;
- годографы бароклинных и баротропных течений;
- средние спектры колебаний течений и вертикальных смещений изотерм.

Результаты обработки и их анализ представлены ниже.

СРЕДНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЧЕНИЙ, ТЕМПЕРАТУРЫ, СТРАТИФИКАЦИИ В ЗАЛ. МАМАЛА

Течения в зал. Мамала в среднем направлены параллельно берегу на запад [6, 16]. По данным наших измерений в 2003–2004 гг. среднее значение модуля скорости в слое глубже 16 м составляло 11–18 см/с [2, 8]. В верхнем слое скорости течений под воздействием ветра увеличивались, достигая на глубине 10 м 45–65 см/с в 2003 г и 20 см/с в 2004 г. Доминирующими направлениями течений вблизи диффузора в 2003 г. были 230°–280°, а в 2004 г. – 100°–150° и 240°–270° [2, 10].

Температурная стратификация в сентябре 2003 г. значительно отличалась от условий 2002 и 2004 гг. необычайно глубоким положением термоклина, ось которого находилась на глубинах 80–100 м, тогда как в слое от поверхности до глубины 70 м температура воды в течение большей части времени наблюдения колебалась в небольших пределах

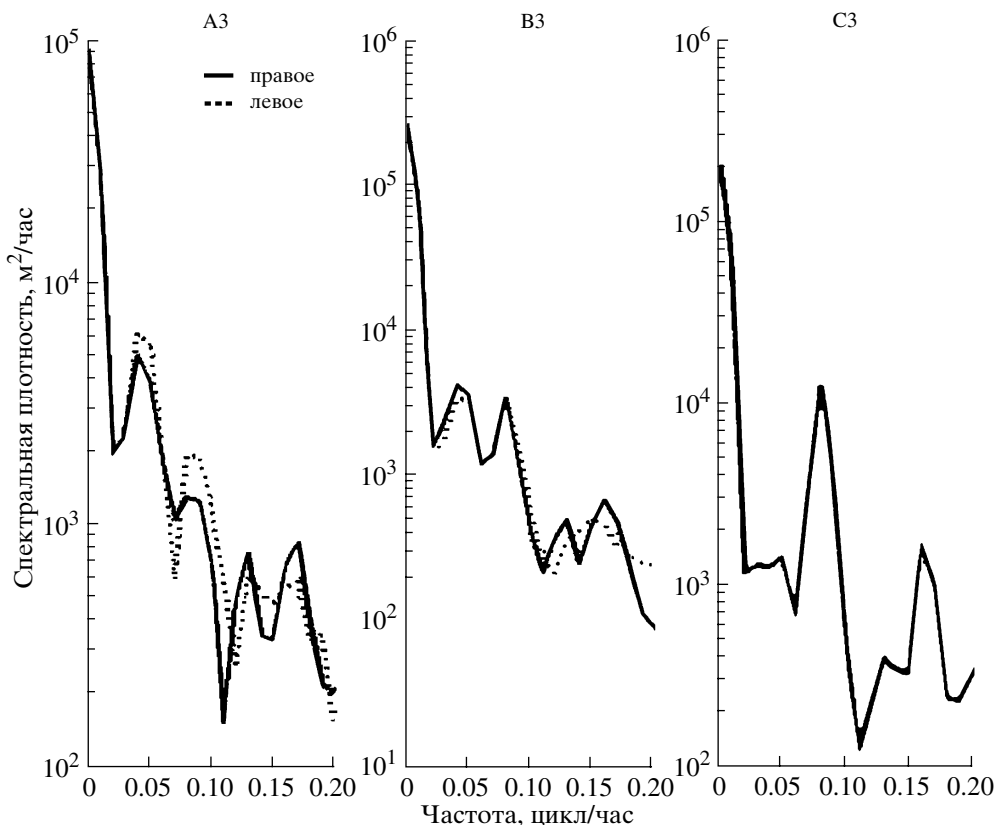


Рис. 2. Спектры вращательных компонентов течений на станциях Av, Bv, Cv в 2003 г. на глубине 10 м.

$26 \pm 0.5^\circ\text{C}$ [8, 10]. Во время экспериментов 2002 и 2004 гг. термоклин располагался на глубинах 30–50 м и температуры воды вблизи диффузора на глубинах 28–70 м изменялась от 22 до 28°C [8, 10].

Усредненные значения частоты плавучести, оцененные по данным микроструктурных зондов, изменялись в пределах 5–9 цикл/час в слое 40–45 м в 2003 г. и 5–15 цикл/час на глубинах 30–75 м в 2004 г. [10, 11, 14].

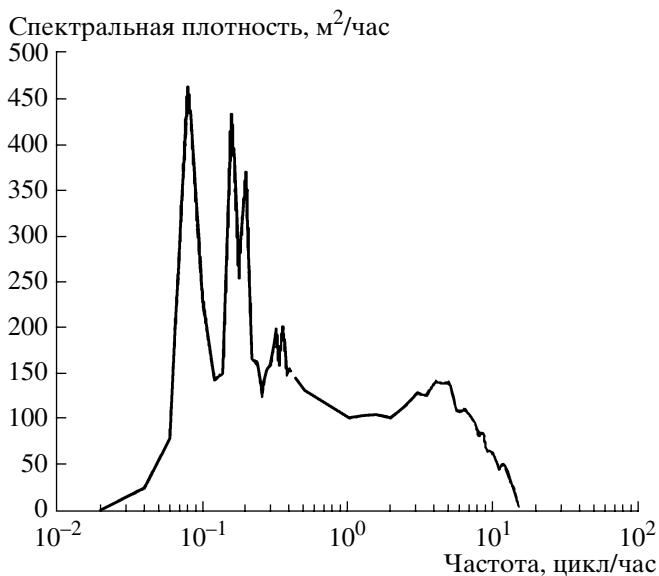


Рис. 3. Спектр вертикальной скорости смещений изотермы в т. Vt в 2004 г.

Рассмотрим полученные при обработке средние спектры колебаний течений и температуры, примеры которых представлены на рис. 2, 3. На рис. 2 приведены спектры вращательных компонентов течений, вычисленные по результатам измерений на станциях Av-Cv на глубине 10 м в 2003 г. Спектры вычислялись для компонентов течений, имеющих правое (по часовой стрелке) и левое (против часовой стрелки) вращение.

Из анализа графиков, представленных на рис. 2, видно, что на средних спектрах вращательных компонентов течений верхнего горизонта левое вращение на частоте M2 преобладает или равно правому, вопреки тому, что должно быть в волнах Свердрупа. Это говорит, соответственно, либо о левом вращении, либо о возвратно-поступательных течениях.

Анализ спектров вращательных компонентов течений, вычисленных по результатам измерений в 2003 г., показал, что колебания на всех частотах в этом году были слабее, чем в 2004 г., но имели тот же характер. Практически полностью возвратно-поступательными были течения в точке C3, о чем

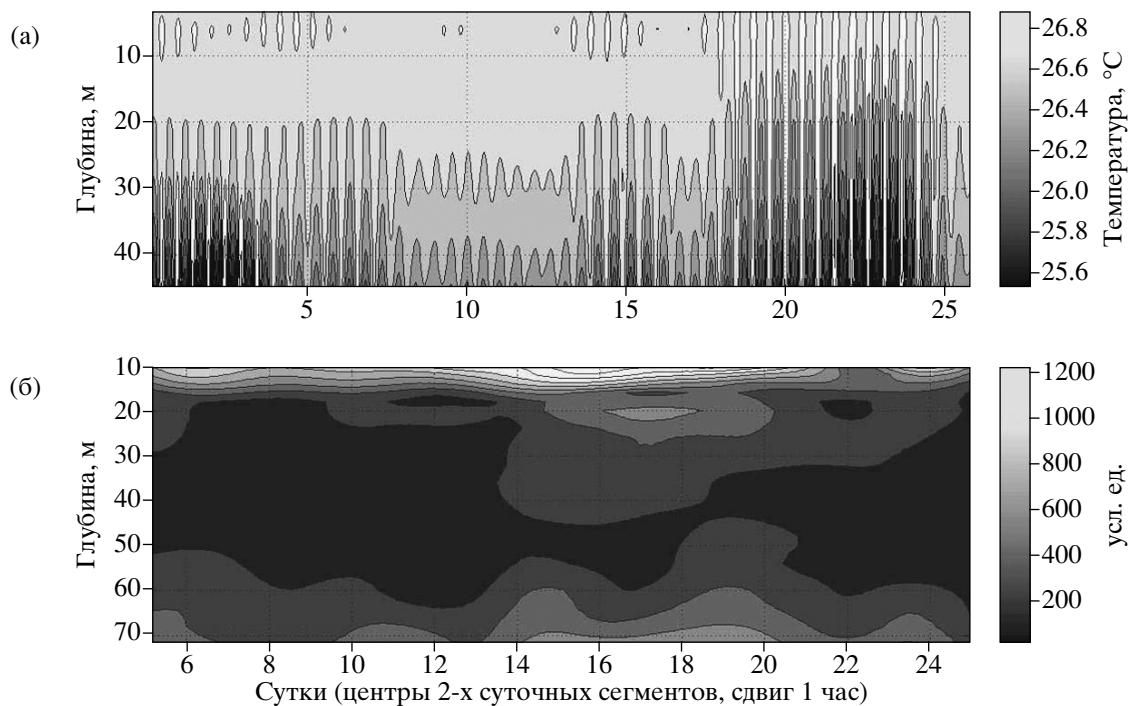


Рис. 4. Графики колебаний изотерм (а) и интенсивности течений (б) в частотном диапазоне полусуточного внутреннего прилива на ст. А в 2003 г.

говорит равенство спектров правого и левого вращения (см. рис. 2).

Поскольку вертикальные компоненты скорости с помощью ADCP измеряются плохо, особенно на низких частотах, нами были рассчитаны спектры скоростей вертикальных смещений изотерм. При этом проводилось предварительное сглаживание фильтром 4-го порядка с частотой среза 20 цикл/час.

На рис. 3 приведен спектр вертикальной скорости смещений изотермы в точке В4, полученный на основании измерений, выполненных в 2004 г. Как видно из рисунка, максимумы спектральной энергии наблюдаются на частотах, соответствующих полусуточным и четвертьсуточным колебаниям. Небольшие пики отмечались также для колебаний с периодами 3–5 час. В высокочастотной части спектра виден широкий пик на частоте 4–5 цикл/час (см. рис. 3).

Перейдем теперь к анализу полусуточных внутренних приливов и их изменчивости.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОЛУСУТОЧНЫХ ВНУТРЕННИХ ПРИЛИВОВ

Для изучения характеристик полусуточных внутренних приливов в б. Мамала проводились исследования временных колебаний изотерм и амплитуд течений внутреннего прилива на разных глубинах.

Сопоставим изменчивость интенсивностей колебаний изотерм и орбитальных течений во внутреннем приливе путем сравнения колебаний изотерм и амплитуд течений на частоте M2. Амплитуды течений оценивались как корень квадратный из суммы спектральных амплитуд горизонтальных компонентов спектра на частоте M2. Затем вычислялись амплитуды скользящих спектров, рассчитанных по перекрывающимся 48-часовым отрезкам со сдвигом на 1 час. На рис. 4а и 4б в качестве примера представлены результаты расчета интенсивности колебаний изотерм (а) и амплитуды течений (б) для точки А3 в 2003 г. В качестве амплитуды течений представлена величина $(S_u + S_v)/2$ в условных единицах, где S_u, S_v – спектры горизонтальных компонентов течения. На основании анализа графиков, приведенных на рис. 4, можно сделать следующие выводы:

- интенсивность внутреннего прилива сильно меняется во времени, высота волн достигает до 40 м и выше (17–19 сутки), но течения при этом слабы. Максимальным же течениям (10–15 сутки) соответствуют менее высокие волны (25 м);

- всплески колебаний скоростей течений и изотерм не обнаруживают полумесячного неравенства (можно усмотреть, скорее, 8-суточную периодичность) и не вполне совпадают по времени между собой,

- течения наиболее сильны в верхнем слое, ослабевая внутри водной толщи, и вновь немного

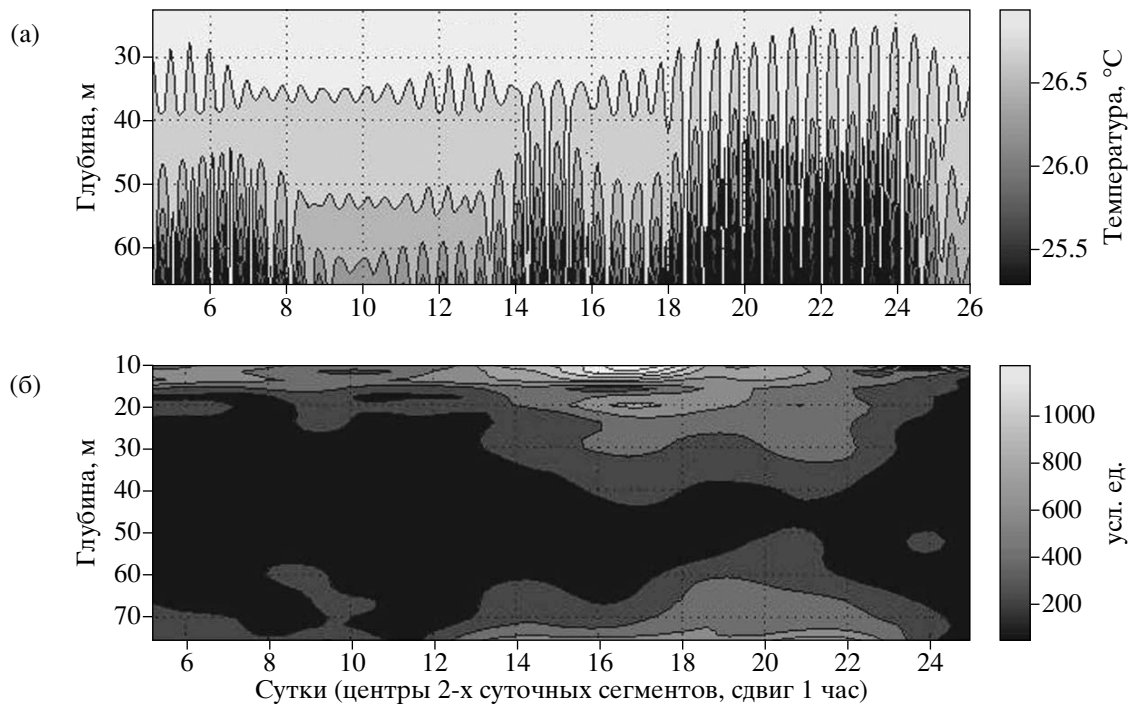


Рис. 5. Графики колебаний изотерм (а) и интенсивности течений (б) в частотном диапазоне полусуточного внутреннего прилива на ст. В в 2003 г.

возрастают ко дну, что естественно при доминировании низшей моды.

В точке В3 (рис. 5) в 2003 г. наблюдалась похожая картина, но несогласованность изменений интенсивности течений и амплитуды внутренних волн, а также колебаний в верхнем и нижнем слоях проявляется ярче, чем в точке А3. Амплитуда внутренних волн на 18–20 сутки тоже достигает до 40 м. В верхнем слое течения океана в 2003 г. были наиболее сильны на 12–13 сутки, когда высота волн резко уменьшилась до немногих метров. В нижнем же слое течения, в общем, были более слабыми и достигали максимума лишь на 16–17 день. В целом, доминирование низшей моды здесь менее очевидно, но зато можно заметить признаки лучевого распространения волн.

Похожая картина сложных и не вполне согласующихся между собой изменений интенсивности колебаний изотерм и течений наблюдалась и в 2004 г.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГОДОГРАФОВ ТЕЧЕНИЙ ПОЛУСУТОЧНЫХ ВНУТРЕННИХ ПРИЛИВОВ

В существующих публикациях практически не уделялось внимания изменению таких важных параметров, как волновые орбиты, хотя и отмечался их необычный характер (левое вращение [18]). Восполняя этот пробел, обратимся к анализу пространственно-временной изменчивости годографов течений внутреннего прилива. Поскольку форма годо-

графа (т.е. линии, описываемой концом вектора течений) совпадает с формой траектории, по которой переносятся частицы воды, годографы хорошо характеризуют орбитальное движение воды.

При обработке экспериментальных данных нами были построены годографы течений внутреннего прилива на основе результатов измерений на всех станциях в 2003–2004 гг. На рис. 6 и 7 в качестве примеров приведены годографы внутренних и баротропных приливов М2 на станциях В3, С4. Усредненные за сутки волновые орбиты построены для глубин 10–76 м.

Анализ волновых орбит показал, что во всех случаях, кроме точки С3, орбиты внутреннего прилива М2 сильно менялись во времени и в пространстве, лишь иногда принимая “правильную” (как в волнах Свердруп) форму (рис. 6 и 7). Экспериментальные данные о течениях в точке С3, где были обнаружены почти исключительно возвратно-поступательные движения на всех горизонтах, представляются сомнительными.

На станции В3 (рис. 6) наблюдалась лишь узкая область в верхнем слое, где орбиты имели правое вращение (12–13 день, начальные точки орбит обозначены звездочками). Несколько более обширная область правильных орбит была обнаружена в точке С4 на 7–10 день измерений, когда интенсивность баротропных приливных течений достигла максимума. Правильные и одинаково направленные (вдоль меридиана) орбиты наблюдались почти во

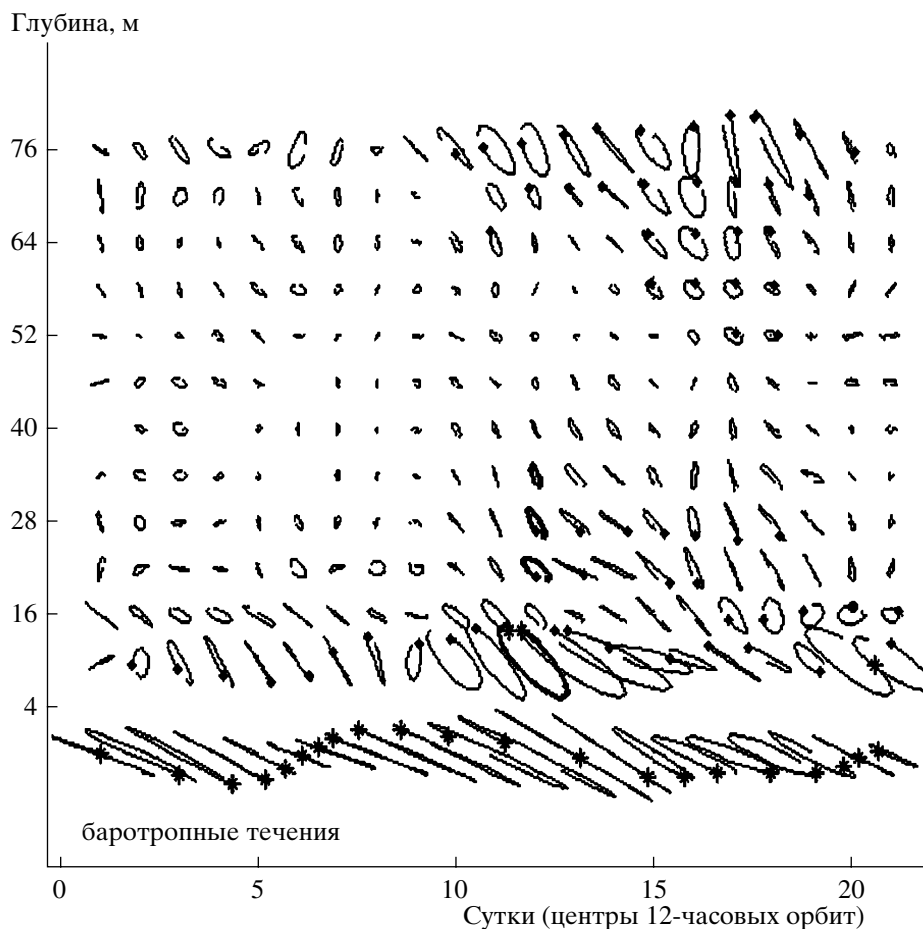


Рис. 6. Годографы внутренних и баротропных (внизу) приливов в частотной области M2 в т. Bv в 2003 г. Звездочками обозначено начало орбит.

всей водной толще, усиливаясь ко дну и к поверхности (рис. 7). Однако эпизоды правильных орбит были довольно кратковременными и, к тому же, несинхронными и различающимися по направлению в верхних и нижних слоях. В середине водной толщ орбиты уменьшались.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ПРИЛИВОВ

Анализ результатов проведенной обработки позволил выявить сложную пространственно-временную изменчивость внутреннего прилива в бухте Мамала, которая отличалась не только несинхронностью изменений интенсивности ВП на разных глубинах и временными масштабами изменчивости (несколько меньшими, чем при обычном полумесячном неравенстве), но и необычностью и резкой изменчивостью волновых орбит.

Неодновременность изменений интенсивности внутреннего прилива на разных глубинах, по нашему мнению, можно считать проявлением лучевой

природы распространения волн в меняющейся среде. Действительно, несмотря на характерные для низшей моды изменения амплитуд течений с глубиной, в нашем случае речь может идти о преобладании лучевого распространения волн, в которых течения также усиливаются у дна и поверхности, но не одновременно, как это должно быть в стоячей по вертикали моде. Более того, изменение с глубиной ориентации и вращения течений в орбитах вообще противоречит представлению о более или менее правильной низшей моде.

Наблюдающуюся “пляску” волновых орбит естественно связывать с интерференцией волн разных направлений с меняющимися параметрами. В самом деле, орбиты течений внутреннего прилива при сложении волн, приходящих с разных направлений, могут сильно отличаться от “правильных”. Как известно, правильные орбиты вытянуты в направлении распространения волн при соотношениях малых и больших осей орбит $e = f/M2$ [4], где f – частота Кориолиса. Для исследуемого района $e = 0.38$.

Изменчивость орбит при интерференции волн продемонстрируем на примере сложения волн

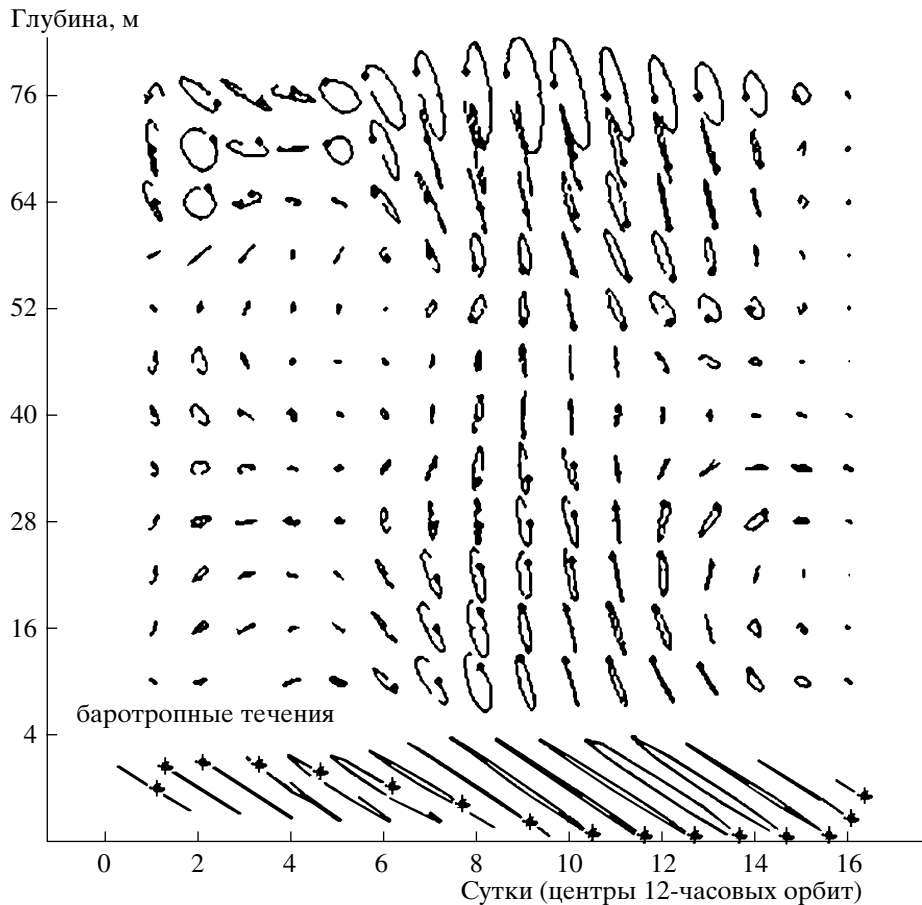


Рис. 7. Годографы внутренних и баротропных (внизу) приливов M2 в т. Св в 2004 г. Звездочками обозначено начало орбит.

Свердрупа, приходящих с востока (волна 1) и с северо-запада (волна 2), что близко к ситуации, наблюдающейся в зал. Мамала. Компоненты течений элементарной волны в направлении ее распространения и в поперечном направлении обозначим:

$$U = a \cdot \sin(M2 \cdot t + P), \quad V = a \cdot e \cdot \cos(M2 \cdot t + P),$$

где a – амплитуда, $M2$ – частота, P – фаза.

Результаты расчетов орбит течений, возникающих при сложении двух правильных волн с различающимися амплитудами и фазами приведены на рис. 8, где показаны исходные “правильные” и суммарные годографы течений для некоторых значений амплитуд и разности фаз между волнами 1 и 2.

При сложении волн с равными амплитудами и разностью фаз $P = 180^\circ$ (рис. 8а) суммарная орбита напоминает “правильную”, но уже при увеличении разности фаз всего на 30° ($P = 210^\circ$) орбита сильно вытягивается и течения вращаются против солнца. При увеличении разности фаз еще на 30° ($P = 240^\circ$) орбита становится круговой, сохраняя “неправильное” вращение (рис. 8б), а при $a_1/a_2 = 1/2$ и фазе $P = 240^\circ$ – орбита снова вытягивается, но в перпендикулярном случае $P = 210^\circ$ направлении,

и течения становятся практически возвратно-поступательными (рис. 8в).

Таким образом, интерференция волн различных направлений не только не позволяет судить о направлении волн по ориентации суммарных течений, но может менять направление вращения течений и существенно искажать форму орбит вплоть до круговых или возвратно-поступательных траекторий в зависимости от направления волн, их амплитуд и фаз.

Выявленное нами в зал. Мамала преобладание левого вращения течений внутреннего прилива (как и баротропного прилива), которое было отмечено еще в работе [12] и осталось необъясненным, скорее всего, связано именно с суперпозицией волн разных направлений. При этом, если меняется плотностная стратификация и фоновые течения, неизбежна и временная изменчивость орбит, так хорошо проявляющаяся в рис. 4–8. Нетрудно убедиться, что при изменении скорости волны длиной 20 км всего на 20% фаза меняется на 30° . Картина еще более усложняется из-за возможного влияния пограничных волн (например, волн Кельвина) и внутренних приливов, генерируемых локально.

Показательно, что на полусуточных колебаниях изотерм в 2004 г., построенных по данным термогирлянды, установленной в точке D4 (рис. 9), которая находилась несколько ниже бровки шельфа, отчетливо заметно движение волны внутреннего прилива вверх. Это соответствует распространению энергии наклонной волны вниз, излученной, по-видимому, несколько выше на бровке шельфа, что согласуется с гипотезой о существенной роли локальной генерации волн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа данных измерений температур и скоростей течений в б. Мамала, проведены исследования изменчивости характеристик полусуточного внутреннего прилива. По результатам исследований установлено, что величины, формы и ориентации орбит, а также направления вращения орбитальных течений внутреннего прилива сильно меняются в пространстве и во времени. При этом формы орбит и направления вращения орбитальных течений лишь изредка приобретают черты, свойственные прогрессивным внутренним волнам на вращающейся Земле.

С выявленными фактами лучше всего согласуется следующая картина формирования поля внутреннего прилива на шельфе залива:

- приходящие из проливов и испытывающие рефракцию на наклонном дне волны низшей моды складываются с волнами, которые спорадически генерируются у края шельфа при возникновении благоприятных для локальной генерации фоновых условий;

- при средней плотностной стратификации в исследуемой акватории наклоны дна здесь сверхкритические, что препятствует излучению волн от края шельфа;

- в действительности поле внутреннего прилива формируется здесь, по-видимому, не только приходящими издали волнами, как это обычно считалось ранее [5, 12, 15, 16, 18], но и волнами локального происхождения, возникающими при благоприятных для этого условиях;

- фоновые условия изменяются и на пути распространения идущих из проливов внутренних приливов, что приводит к изменению параметров последних и еще более усложняет пространственно-временную изменчивость поля;

- сильная временная изменчивость гидрологических условий в верхнем слое может приводить к тому, что в некоторые моменты времени наклоны дна у кромки шельфа уже не будут сверхкритическими и, следовательно, возможна локальная генерация внутренних приливов у кромки шельфа;

- несмотря на характерные для низшей моды изменения амплитуд течений с глубиной, наблюдавшиеся во всех случаях, говорить о безусловном

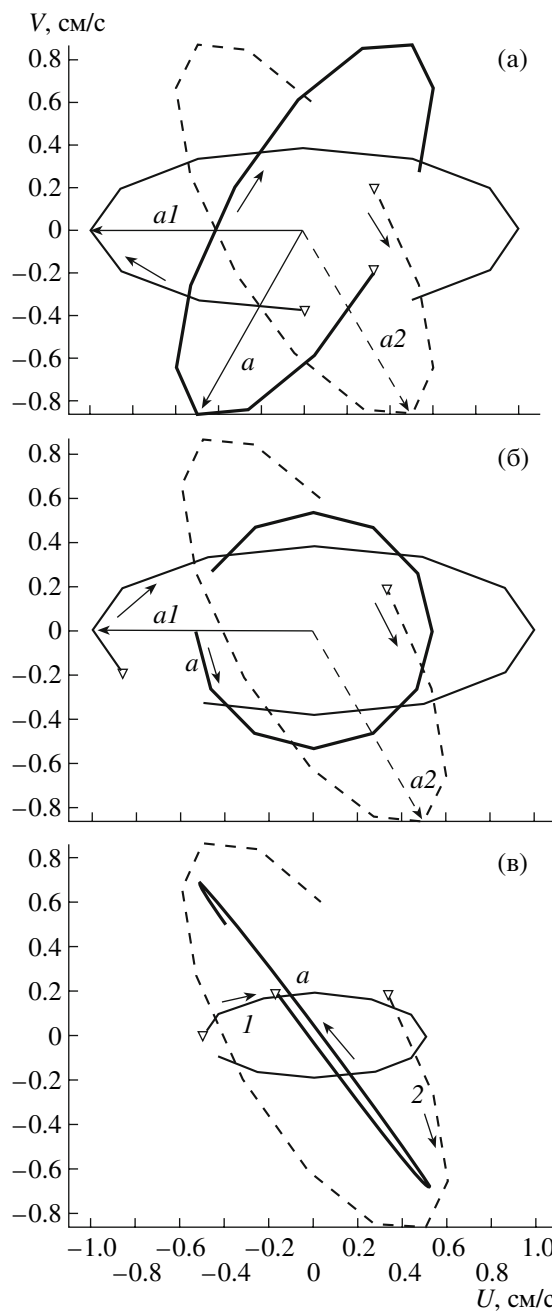


Рис. 8. Годографы течений при сложении волн 1 (волна направлена на запад, 270°) и 2 (волна направлена на 150°) для различных значений отношения амплитуд волн и разности фаз: (а) $a1 = a2$, разность фаз $P = 180^\circ$; (б) $a1 = a2$, $P = 240^\circ$; (в) $a1/a2 = 1/2$, $P = 240^\circ$.

доминировании низшей моды в заливе вряд ли допустимо, поскольку и при лучевом распространении волн течения также усиливаются у дна и поверхности.

Выявленное разновременное усиление волн вверх и вниз и изменение с глубиной ориентации и вращения течений в орбитах вообще противоречит представлению о более или менее правильной

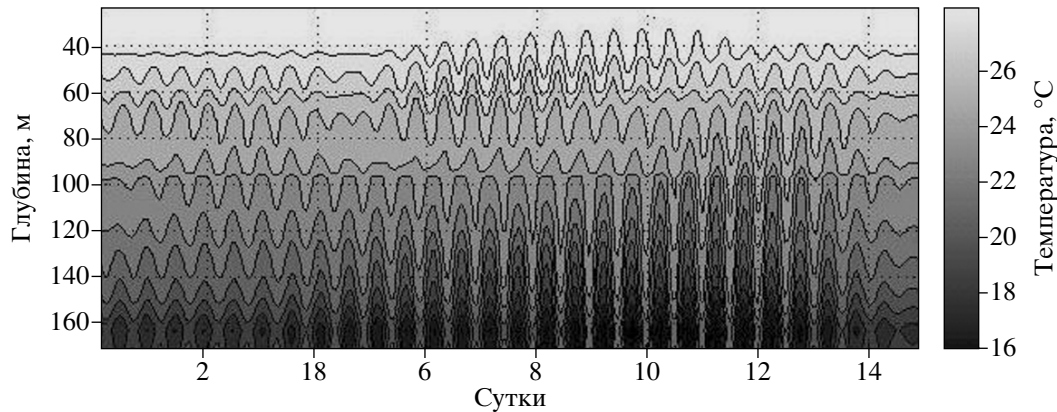


Рис. 9. График полусуточных колебаний изотерм в т. Дт в 2004 г.

низшей моде. В такой картине волнового поля естественнее усматривать проявление лучевого распространения, характерного для ближней зоны поля внутреннего прилива.

Для подтверждения высказанной гипотезы о локальной генерации внутренних приливов на краю шельфа зал. Мамала должен быть проведен подробный анализ орбит течений и вертикальных колебаний изотерм в сочетании с характеристикой меняющихся фоновых условий. Важно выяснить также, не трансформируются ли приходящие из пролива волны Свердрупа в волны Кельвина над крутым материковым склоном о. Оаху.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии // Новые идеи в океанологии. Т. 1. М.: Наука, 2004. 352 с.
2. Бондур В. Г., Филатов Н.Н., Гребенюк Ю.В. и др. Исследования гидрофизических процессов при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории (на примере бухты Мамала, о. Оаху, Гавайи) // Океанология. 2007. Т. 47. № 6. С. 827–846.
3. Ведерников В.И., Бондур В.Г., Виноградов М.Е. и др. Влияние антропогенных воздействий на планктонные сообщества акватории бухты Мамала (о. Оаху, Гавайские острова) по корабельным и спутниковым данным // Океанология. 2007. Т. 47. № 2. С. 241–258.
4. Коняев К.В., Сабинин К.Д. Волны внутри океана. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 272 с.
5. 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. P. 997–1118.
6. Atlas Hawai'i. Third Edition // Honolulu: University of Hawai'i Press, 1998. 334 p.
7. Bondur V.G. Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas // Proc. 31st Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, St. Petersburg: Plenary presentation, 2005. P. 1–6.
8. Bondur V.G., Filatov N. N. Study of physical processes in coastal zone for detecting anthropogenic impact by means of remote sensing // Proceeding of the 7 Workshop on Physical processes in natural waters, Petrozavodsk, Russia, 2003. P. 98–103.
9. Bondur V., Starchenkov S. Monitoring of Anthropogenic Influence on Water Areas of Hawaiian Islands Using RADARSAT and ENVISAT Radar Imagery // 31st Int. Symp. on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2006. P. 184–187.
10. Bondur V., Tsidilina M. Features of Formation of Remote Sensing and Sea truth Databases for The Monitoring of Anthropogenic Impact on Ecosystems of Coastal Water Areas // 31st Int. Symp. on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2006. P. 192–195.
11. Gibson C., Bondur V., Keeler R., Pak Tao Leung. Remote Sensing of Submerged Oceanic Turbulence and Fossil Turbulence // Int. J. Dynamics of Fluids (IJDF). 2006. V. 2. № 2. P. 111–135.
12. Holloway P.E., Merrifield M.A. On the spring-neap variability and age of the internal tide at the Hawaiian Ridge // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № C4. P. 3126.
13. Keeler R., Bondur V., Vithanage D. Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // Sea Technology. 2004. № 4. P. 53–58.
14. Keeler R., Bondur V., Gibson C. Optical satellite imagery detection of internal wave effects from a submerged turbulent outfall in the stratified ocean // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L12610, doi:10.1029/2005GL022390.
15. Merrifield M.A., Alford M.H. Structure and variability of semidiurnal internal tides in Mamala Bay, Hawaii // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. № C8. 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. Munk W., Wunsch C. Abyssal recipes II: energetics of tidal and wind mixing // Deep-Sea Res. 1998. V. 45. P. 1977–2010.
18. Petrenko A.A., Jones B.H., Dickey T.D., Hamilton P. Internal tide effects on a sewage plume at Sand island, Hawaii // Cont. Shelf Res. 2000. V. 20. P. 1–13.

Variability of the Internal Tide in the Coastal Water Area of Oahu Island (Hawaii)**V. G. Bondur, Yu. V. Grebenjuk, K. D. Sabinin**

Variability of the semidiurnal internal tide parameters in Mamala Bay (Oahu Island) was investigated by using the data of ADCP and thermistor strings deployed at the shelf break for two weeks in late summer of 2003 and 2004. It is shown that size, form and orientation of the internal tide hodographs, as well as sign of the current rotation are highly variable in time and space. All these parameters correspond to the theoretical ones typical for progressive internal waves only sporadically. Such unusual features of internal tide orbits are explained by the interference of the waves coming to Mamala Bay from both sides of Oahu Island. Due to supercritical inclination of the bottom at the shelf break in the bay the local generation of internal tide occurs only sporadically when the density stratification weakens.