

УДК 551.465

ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МОНИТОРИНГЕ АНТРОПОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРИБРЕЖНЫЕ АКВАТОРИИ (НА ПРИМЕРЕ БУХТЫ МАМАЛА, ОСТРОВА ОАХУ, ГАВАЙИ)

© 2007 г. В. Г. Бондур¹, Н. Н. Филатов², Ю. В. Гребенюк¹, Ю. С. Долотов³, Р. Э. Здоровенинов²,
М. П. Петров², М. Н. Цидилина¹

¹Научный центр аэрокосмического мониторинга "АЭРОКОСМОС", Москва

²Институт водных проблем Севера РАН, Петрозаводск

³Институт водных проблем РАН, Москва

e-mail: vgbondur@online.ru

Поступила в редакцию 18.10.2006 г.

В настоящей работе представлены основные результаты обработки данных, полученных при исследованиях гидрофизических процессов во время проведения комплексного мониторинга антропогенных воздействий на прибрежную акваторию б. Мамала (о. Оаху, Гавайи). В качестве исходных данных использованы результаты гидрофизических измерений, проведенных в августе–сентябре 2002–2004 гг. с помощью стационарных буйковых станций, погруженных и буксируемых судовых датчиков. По данным этих измерений рассчитаны пространственно-временные, статистические, спектральные характеристики различных гидрофизических параметров морской среды в акватории б. Мамала, в том числе такие как: трехмерные компоненты векторов скоростей течений; спектры различных компонентов скоростей течений; спектры флуктуаций температуры; характеристики внутренних волн. Выполнен анализ изменчивости полей температуры, связи приливно-отливных явлений с изменениями температуры и внутриволновыми колебаниями. Приведены материалы и методы океанографических исследований, результаты анализа метеорологических и гидрологических условий. Полученные результаты используются для комплексного анализа космических и спутниковых данных.

ВВЕДЕНИЕ

Антропогенное загрязнение вод Мирового океана оказывает значительное негативное воздействие на его экологические системы [9, 10]. Одним из наиболее распространенных источников антропогенного влияния на прибрежные акватории являются заглубленные стоки. Воздействие заглубленных стоков приводит к эвтрофикации морских вод, токсическому и микробиологическому загрязнению прибрежных зон океана. Значительная концентрация загрязняющих веществ антропогенного происхождения в приповерхностном слое океана приводит к нарушениям баланса экосистем и к снижению биопродуктивности акваторий. В связи с этим чрезвычайно актуальными становятся комплексные исследования морской среды с использованием дистанционных и контактных измерений.

Для снижения негативных воздействий на прибрежные зоны океана сбросы в море производятся по заглубленным трубопроводам на достаточно большом удалении от берега и на значительной глубине. Диффузоры сбросовых устройств стремятся расположить ниже слоя скачка плотности, так как он препятствует подъему сточных вод на поверхность. Однако плотностная стратификация мор-

ской воды подвержена значительным сезонным колебаниям, и при ее сильном ослаблении могут возникать ситуации, при которых сбрасываемые воды могут подниматься до поверхности, оказывая неблагоприятное воздействие на экосистемы прибрежных акваторий [3, 6]. Поэтому большое внимание должно уделяться исследованию гидрофизических процессов в акваториях, подверженных таким антропогенным воздействиям. Исследование этих процессов необходимо также для верификации данных, полученных при мониторинге космическими средствами [2].

Основной целью экспериментов, проводимых в исследуемой акватории б. Мамала в 2002–2004 гг., являлось совершенствование системы оценки и предупреждения возможного загрязнения рекреационной зоны о. Оаху (Гавайи) [12, 16]. Для изучения особенностей распространения и трансформации глубоководного стока в 2002–2004 гг. проведены комплексные океанографические исследования полей течений, турбулентного перемешивания, внутренних волн, колебаний уровня океана, температуры и солености воды, а также ветрового волнения, химико-биологических параметров и гидрометеорологических условий в сочетании со спутниковыми наблюдениями. Все измерения были

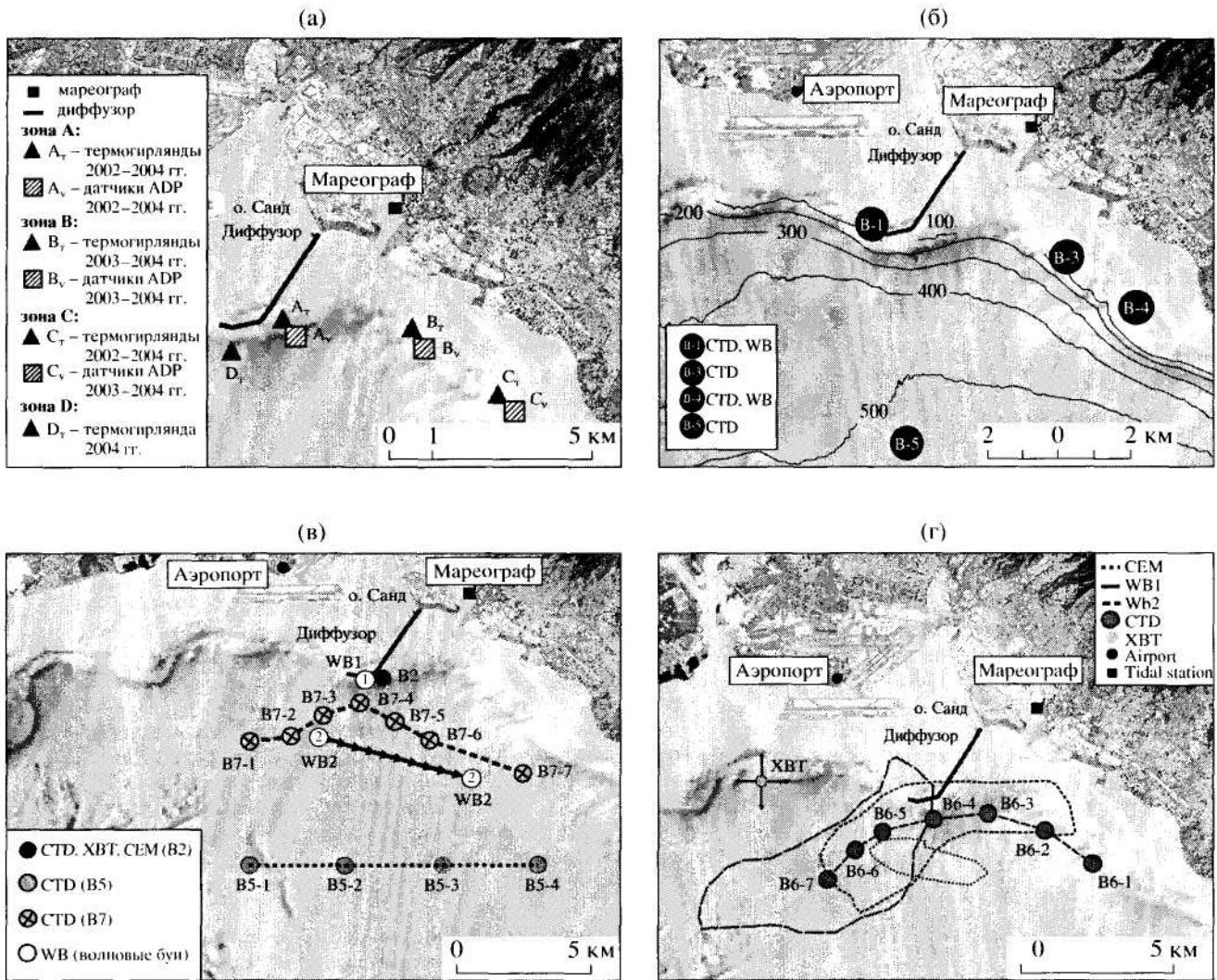


Рис. 1. Схемы расположения заякоренных буйковых станций ADP, TS, Aanderaa String (а) и измерений, проводимых с судов, в 2002 г. (б), 2003 г. (в), 2004 г. (г).

проводены по единой методике, на одной и той же сетке автономных буйковых станций, с судов, а также береговых постов в сочетании с дистанционными измерениями с нескольких спутников [2, 5, 8, 12, 17].

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе проведения мониторинга прибрежной акватории о. Оаху (Гавайи) в августе–сентябре 2002–2004 гг. измерялись гидрофизические характеристики с использованием стационарных буйковых станций и с борта нескольких небольших судов. Судовые и буйковые средства располагались в исследуемой акватории таким образом, чтобы была обеспечена возможность проведения измерений рядом с источником антропогенного воздействия (сбросовым устройством) и на некотором удалении от него (2–10 км от сбросового устройства) в различных

точках акватории б. Мамала. При этом измерялись температура и векторы скоростей течений с использованием стационарных буйковых систем (Aanderaa, термисторов TS, ADP-профилографов), дрифтеров, с борта судов зондами CTD, XBT, Compact-EM, опускаемыми микроструктурными зондами типа MSS и TOMI [12, 13, 16].

На рис. 1 приведены схемы расположения заякоренных буйковых станций ADP, TS, Aanderaa String в 2002–2004 гг. и измерений, проводимых с судов.

Из рис. 1a следует, что стационарные буйковые станции во все годы проведения измерений располагались примерно в одних и тех же местах. Места расположения датчиков условно можно разделить на четыре зоны: зона A – вблизи диффузора, зона B – в ~3.5 км к востоку от диффузора, зона C – в ~7 км к юго-востоку от диффузора, зона D – в 1 км к югу от диффузора. Отличие в схемах расположения датчиков в разные годы состояло в том, что в 2004 г. была

установлена дополнительно станция измерений температуры воды в точке D_T .

Акустические измерители течений ADP (см. рис. 1а) были установлены на дне и регистрировали три компонента скорости (V_e , V_n , V_u) в диапазоне глубин от дна до 3.5 м через каждые 2 м с дискретностью 1 мин. Наибольшая продолжительность измерений составляла 3 недели [16].

Длительные измерения температуры воды проводились термокосами (Aanderaa, TS) на залеженных станциях с дискретностью 5 мин (Aanderaa в 2002 г. и 2003 г.), 2 мин (TS в 2003 г.) и 30 с (TS в 2004 г.) [16]. Термокосы устанавливались рядом с местами установки ADP (см. рис. 1а).

При проведении натурных экспериментов измерения вертикальных профилей температуры, солености и плотности воды выполнялись с борта судов СТД-зондами и обрывными зондами ХВТ (см. рис. 1б, 1в, 1г). В различные годы для проведения этих измерений использовались 4–5 судов.

С борта судов выполнялись также измерения с помощью микроструктурных зондов MSS (2002–2004 гг.) и TOMI (2004 г.) для получения вертикальных и пространственно-временных распределений температуры, солености, плотности, мутности, частоты Вясяля–Брента и других характеристик [17, 20].

Учитывая существенное влияние приливно-отливных явлений на различные процессы, происходящие в акваториях вблизи Гавайских о-вов в период проведения комплексных экспериментов, регистрировались изменения высоты уровня океана на береговой станции (см. рис. 1) с дискретностью 6 мин.

Измерения скоростей и направлений ветра выполнялись анемометрами как на стационарных береговых станциях Аэропорт (2002–2004 гг.), SITTP (2003 г.), Kawala (2003 г.), так и на судах в различных точках акватории.

Анализ исходных данных показал, что для изучения высокочастотных флуктуаций внутренних волн и течений расчеты выполнялись с минимальной дискретностью измерений для каждого процесса, т.е. 0.5–5 мин, а минимально возможная дискретность для взаимного статистического анализа всех гидрофизических процессов составляла 6 мин (2004 г.) и 30 мин (2002 и 2003 гг.). С учетом дискретности и длительности измерений удалось исследовать изменчивость океанографических процессов в масштабах от нескольких минут до полутора месяцев.

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВО ВРЕМЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В АКВАТОРИИ БУХТЫ МАМАЛА В 2002–2004 гг.

Анализ результатов предыдущих исследований [11] показал, что в указанном районе доминируют течения, направление, скорость и интенсивность

которых являются сложными функциями комплекса условий: атмосферной циркуляции, приливов, местных метеоусловий, рельефа дна и берегов, а также сезонных изменений океанских течений. Обтекая остров, крупномасштабные течения создают кольцевые токи на стороне острова, расположенной по течению. Течения на склоне у островов обычно направлены параллельно берегу, в основном в западном направлении, но могут изменять направление на противоположное из-за действия приливов [8, 11].

При проведении экспериментов в исследуемый период преобладали ветры близового характера (с острова и на остров в разное время суток) и пассатные. На рис. 2а, 2б в качестве примера приведены некоторые результаты обработки характеристик ветрового режима, полученные в 2004 г. Преимущественные направления ветра, зафиксированные на наземной станции Аэропорт в 2002–2004 гг., находились в секторе 0–80° со средними скоростями ~6 м/с и максимальными до 11.5 м/с (см. рис. 2). Значения скоростей ветра, зарегистрированные на судах, составляют в среднем 6–8 м/с и имеют тенденцию к увеличению по мере удаления от диффузора в мористую зону. Максимальные скорости ветра достигали ~11 м/с. Преобладающим направлением ветра являлось северо-восточное (см. рис. 2).

Результаты взаимного анализа ветра и океанографических параметров показали, что ветровые условия во время подспутниковых экспериментов оказывали заметное воздействие на особенности вертикального распределения и изменчивость океанографических параметров только в верхнем 10-метровом слое.

Во время проведения натурных экспериментов в исследуемый период наблюдался примерно одинаковый характер колебаний уровня океана под действием приливных течений. Максимальный уровень прилива с доминирующим полусуточным периодом (волна M_2) составлял около 0.8 м (в 2002 и 2004 гг.) и 0.9 м (в 2003 г.). Отмечались также суточные приливные флуктуации и многосуточные приливные неравенства (см. рис. 2в).

Известно, что в районе Гавайских о-вов отмечаются поверхностные волны нескольких типов [11]. Во-первых, ветровые волны, генерированные пассатными ветрами с высотой 1.2–3.6 м и периодом 5–8 с, которые набегают на острова с северо-востока в течение почти всего года, но достигают максимума летом. Во-вторых, штормовые волны “контр-пассат” высотой 3.0–4.5 м и периодом 8–10 с. Эти волны генерируются локальными атмосферными фронтами и возникают в любое время года, но преобладают поздней зимой или ранней весной. Также присутствует южная зыбь высотой 0.3–1.2 м и периодом 14–22 с, которая является порождением удаленных штормов в зимний период Южного полушария (лето и ранняя осень на Гавайях). И, наконец,

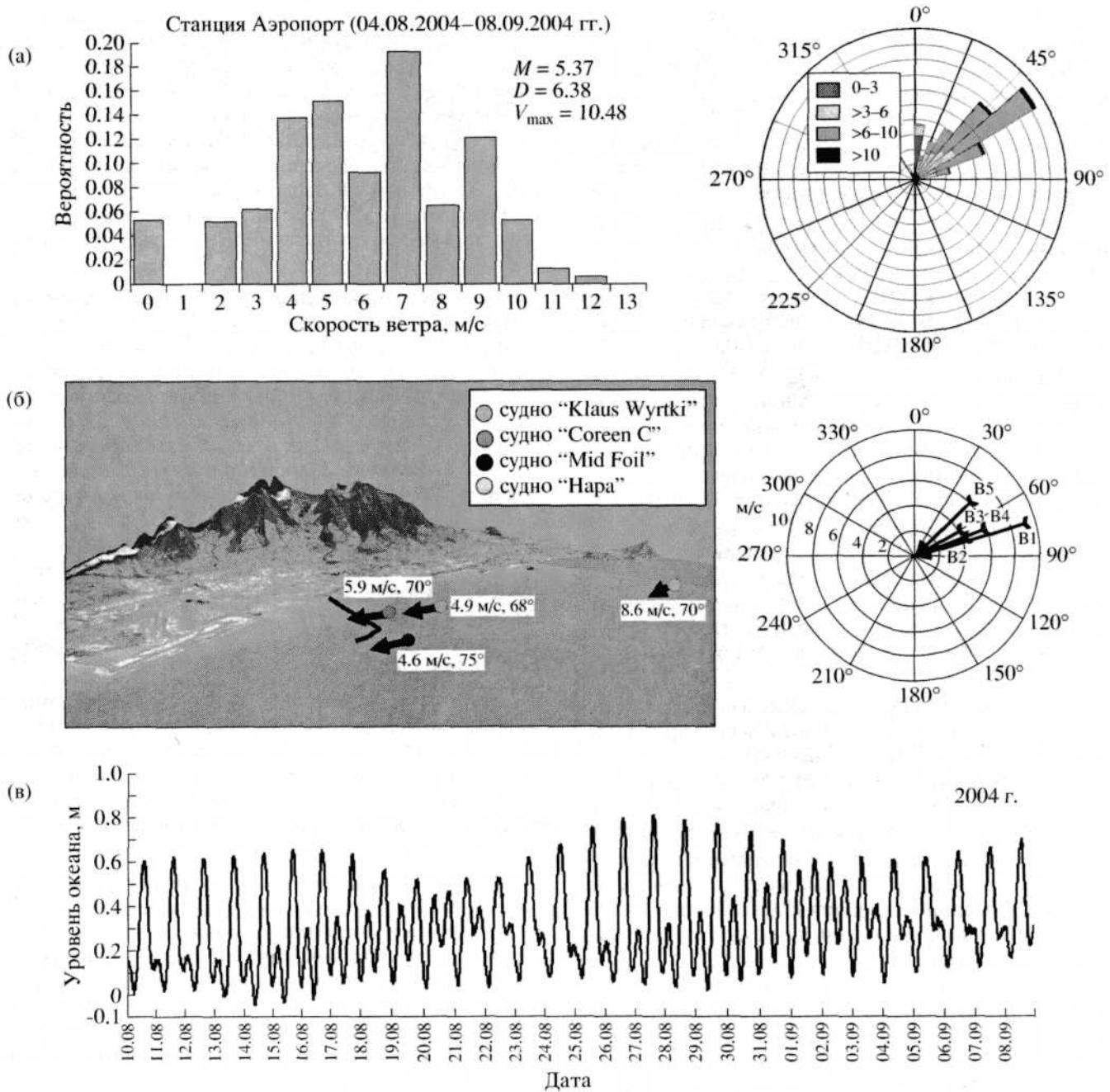


Рис. 2. Примеры результатов обработки данных ветрового режима, полученных на наземной станции Аэропорт в 2004 г. (а) и в акватории с борта судов 16.08.2004 г. (б). Изменение уровня океана в августе–сентябре 2004 г. (в).

наблюдается северная зыбь высотой 2.4–4.2 м и периодом 10–15 с, возникающая за счет удаленных штормов на севере Тихого океана зимой и ранней весной. Однако в этот период эксперименты не проводились.

В результате анализа характеристик поверхностного волнения в акватории бухты Мамала, полученных в процессе проведения экспериментов с волновыми буями, была проведена оценка частотных $S(\omega)$

и частотно-направленных спектров в интервале частот $0.157 \leq \omega \leq 3.644 \text{ с}^{-1}$, т.е. для диапазона гравитационных волн. Оказалось, что одномерные спектры $S(\omega)$ достаточно устойчивы во времени [2, 12]. Они имеют, как правило, три сравнительно хорошо наблюдаемых спектральных максимума на частотах $\omega_{\max 1} \approx 0.41 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{\max 2} \approx 0.69 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{\max 3} \approx 1.57 \text{ с}^{-1}$. Это свидетельствует о наличии в исследуемой акватории нескольких систем волн – как ветровых, так и зыби.

Также исследовались поля гидрооптических характеристик с помощью аппаратуры АС-9. Результаты этих исследований изложены в работах [2, 5].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЛЕЙ ТЕЧЕНИЙ

Длительные измерения параметров течений в акватории бухты Мамала выполнялись с помощью акустических доплеровских профилографов ADP [16]. В результате предварительной обработки исходных данных были получены три компонента скоростей течений (V_e , V_n , V_u), модули скоростей и направления течений на 37-ми горизонтах в диапазоне глубин 3.5–76.5 м.

Предварительный анализ данных, полученных этими измерителями полей течений, выявил достаточно сильные (с периодом несколько минут) флуктуации. Поэтому для уменьшения ошибок первичные данные сглаживались и усреднялись.

Обнаруженные в записях течений колебания 3–10-минутных периодов можно считать наиболее высокочастотными составляющими в широком спектре волн, которые могли быть измерены достаточно надежно использовавшейся в экспериментах аппаратурой. По данным этих измерений проводился анализ изменчивости характеристик полей течений во временных масштабах от 3 мин до 1.5 сут, т.е. в диапазоне от частоты Вясяля–Брента N до локальной инерционной частоты (порядка 33 ч). При этом важно было определить генезис, оценить устойчивость течений, особенности генерации обнаруженных колебаний, выяснить, чем обусловлены обнаруженные составляющие в спектрах течений.

Для исследований доминирующего направления переноса в исследуемой акватории бухты Мамала строились трехмерные и двумерные прогрессивно-векторные диаграммы для различных горизонтов [13]. В результате построения таких диаграмм были определены траектории смещения элементов водной среды под воздействием течений. На рис. 3, в качестве примеров, представлены трехмерные прогрессивно-векторные диаграммы течений на глубине ~60 м, построенные по данным измерений в различные периоды времени. На прогрессивно-векторных диаграммах положительным значениям соответствуют направления на север, восток и вверх, отрицательным значениям соответствуют направления на юг, запад и вниз. Анализ диаграмм показал, что в районе диффузора для различных исследуемых временных периодов на всех рассмотренных горизонтах отмечался перенос с доминирующим направлением 220° (на юго-запад). В районе станции, расположенной в 3 км к востоку от диффузора, наблюдалась сильная изменчивость поля течений. Отмечались квазиволновые колебания направления поля течения от юго-западного к юго-восточному.

Изменчивость направления вектора скорости течения более строго оценивается по данным вероятностного анализа. По данным измерений параметров течений в 2002–2004 гг. были построены гистограммы направлений, модулей векторов течений, а также горизонтальных составляющих вектора течений на различных горизонтах. На рис. 4а, 4б, 4д, 4е, в качестве примеров, приведены гистограммы повторяемости направлений векторов скоростей течений в августе–сентябре 2002 и 2004 гг. на горизонтах 20 и 60 м.

По данным непрерывных измерений характеристик течений на станции, установленной вблизи диффузора (рис. 1а), распределение направлений течений на верхнем горизонте имело одномодальную структуру (рис. 4б) с доминирующим направлением 220°–240° (в 2002 г.) и двумодальную структуру с доминирующими направлениями 90°–150° и 240°–320° (в 2004 г.). В среднем слое (глубины 30–40 м) вектор скорости течений имел похожие направления, но большую вероятность, имело юго-восточное направление 100°–120°. В придонном слое течения имели двумодальную структуру (рис. 4а) с направлениями 80–120° и 240–280°, причем с доминирующим направлением на юго-запад, что соответствует основному пассатному течению.

Измерения на станции, удаленной на 3 км к востоку от диффузора (см. рис. 1а), показали, что преимущественными направлениями течений в этом районе были юго-восточные, юго-западные и западные (рис. 4д, 4е).

Общий перенос на станции, удаленной от диффузора на расстояние 7 км в юго-восточном направлении (расположенной на траверзе горы Дайамондхед, см. рис. 1), имел направление СЗ–ЮВ, так как станция располагалась в стороне от основного вдольберегового течения. Наибольшую вероятность имели течения с направлением около 120–130°, т.е. противоположные основному пассатному течению. В среднем слое (горизонт 29.5 м), близком к горизонту сезонного термоклина, течения имеют юго-западное направление, а в придонном слое (горизонты 70 и 75 м) – направление около 310°.

В верхних слоях отмечались относительно слабые квазистационарные течения с флуктуациями, обусловленными локальными ветровыми условиями.

На горизонтах, начиная с 30 м, отмечались течения, испытывающие относительно короткопериодную изменчивость, с временными масштабами от несколько минут до 12 ч. Локальные ветровые условия не оказывали воздействие на изменчивость течений на горизонтах ниже 10 м. Под воздействием приливных сил здесь также проявляются и возвратные течения. Иногда отмечалось и вращение вектора скорости (в течение нескольких часов), что могло быть связано с приливо-отливными движениями и изменениями синоптической ситуации, а также с приливными внутренними волнами на при-

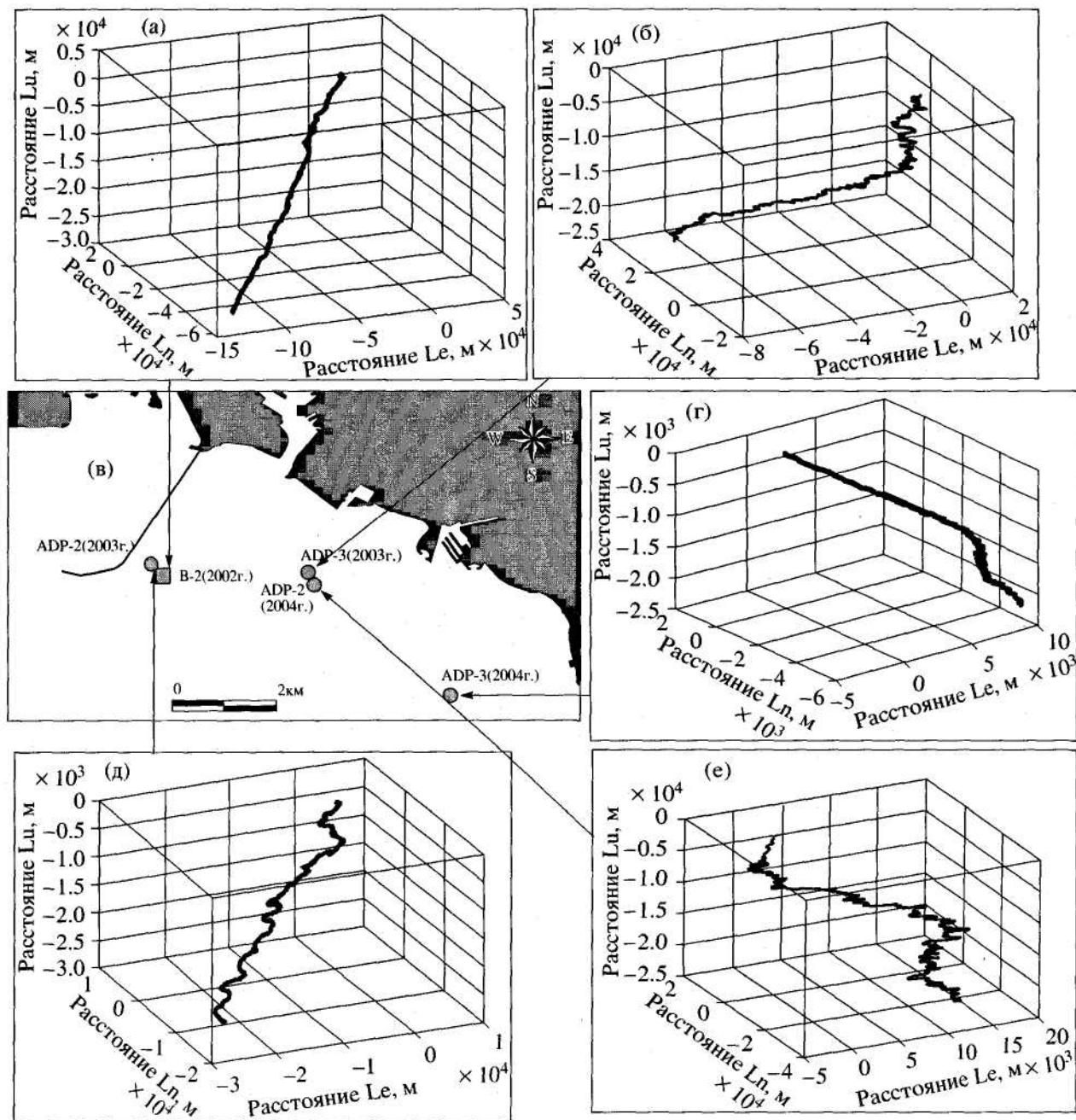


Рис. 3. Примеры прогрессивно-векторных диаграмм, построенных по данным измерений на горизонте ~60 м в акватории б. Мамала в 2002 г. (а), 2003 г. (б, д), 2004 г. (г, е). Схема расположения точек измерений (в).

данных горизонтах (в 2003 г. слой скачка на рассматриваемых станциях располагался вблизи дна). В 2002–2004 гг. в изучаемой прибрежной зоне не было обнаружено инерционных течений в чистом виде (с вращением вектора скорости по часовой стрелке) с временными масштабами, характерными для данной широты места (т.е. порядка 33 ч).

Анализ гистограмм модуля скорости течений показал, что для станции, наиболее близко расположенной к диффузору, а также на станциях, удаленных на восток и юго-восток средние значения модуля скорости течений для всей исследуемой толщи воды составляли 15–20 см/с, максимальные достигали 48.4–82.5 см/с. На рис. 4г представлена гистограмма модуля скорости течений, а в табл. 1 приведены статистические характеристики модуля скоростей течений для периода времени с 1 по 6 сентября в 2002–2004 гг., являющиеся характерными для исследуемой акватории.

На рис. 3 приведены примеры прогрессивно-векторных диаграмм, построенных по данным измерений на горизонте ~60 м в акватории б. Мамала в 2002 г. (а), 2003 г. (б, д), 2004 г. (г, е). Схема расположения точек измерений (в). На рис. 3а, б, д, е видно, что траектория движения векторов скорости в 2003 г. и 2004 г. имеет более выраженные колебания, чем в 2002 г. На рис. 3в показана схема расположения точек измерений в акватории б. Мамала, на которой отмечены места расположения станций ADP-2 и ADP-3 в различные годы изучения. Согласно схеме, в 2002 г. измерения проводились вблизи дна, в 2003 г. – на глубине ~60 м, в 2004 г. – на глубине ~30 м. На рис. 3а, б, д, е видно, что траектория движения векторов скорости в 2003 г. и 2004 г. имеет более выраженные колебания, чем в 2002 г. На рис. 3в показана схема расположения точек измерений в акватории б. Мамала, на которой отмечены места расположения станций ADP-2 и ADP-3 в различные годы изучения. Согласно схеме, в 2002 г. измерения проводились вблизи дна, в 2003 г. – на глубине ~60 м, в 2004 г. – на глубине ~30 м.

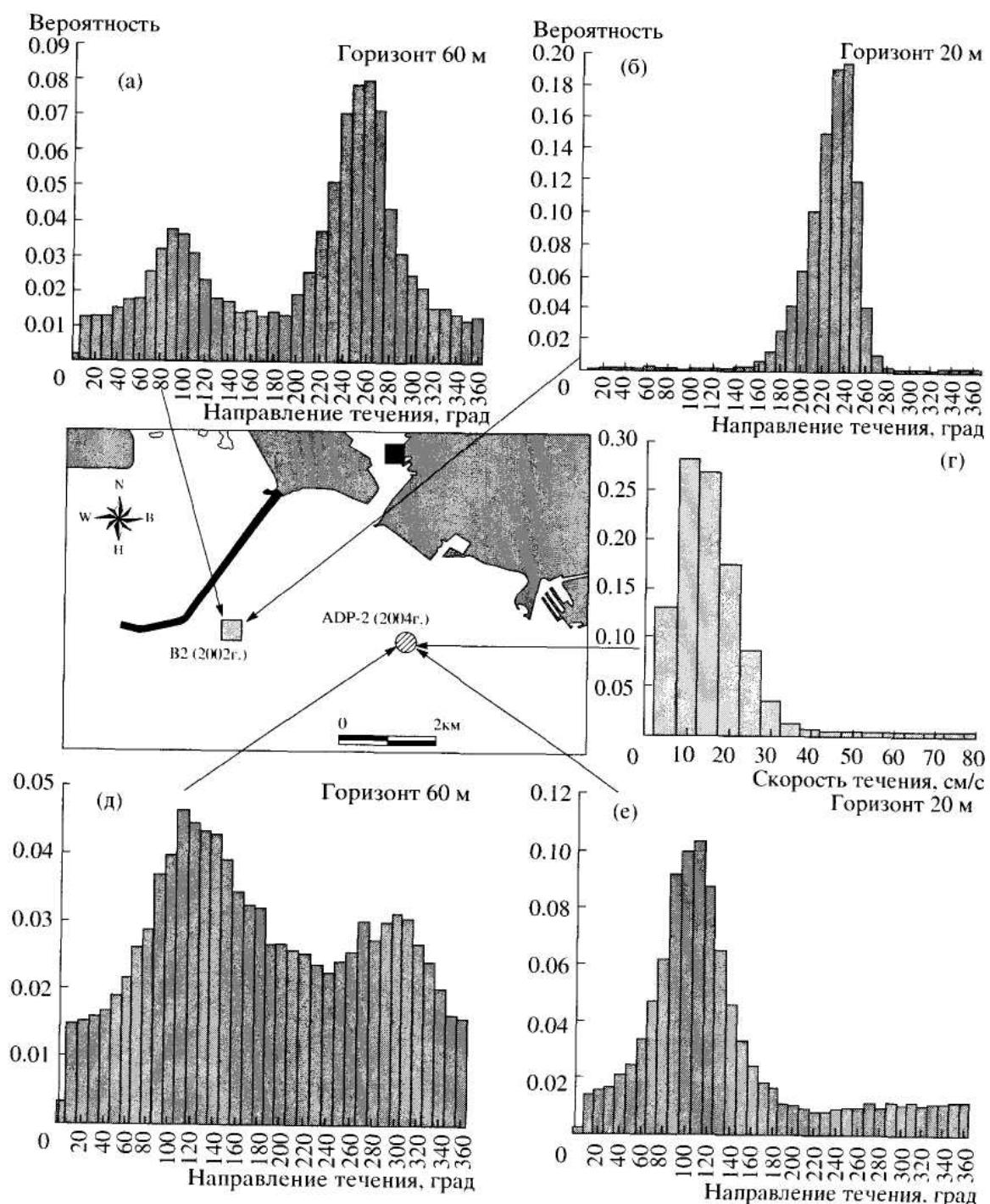


Рис. 4. Гистограммы повторяемости направлений течения в сентябре 2002 г. (а, б), в августе–сентябре 2004 г. (д, е) и модуля скорости течения в августе–сентябре 2004 г. (г). Места проведения экспериментов (в).

Для горизонтальных компонентов вектора скорости течений на всех горизонтах прослеживалась изменчивость, обусловленная приливными движениями с периодом, характерным для полусуточной приливной волны M_2 , т.е. 12.4 ч. При набегании приливной волны на склон о. Оаху отмечалось отклонение вектора скорости от основного направления (рис. 5). Подобные особенности течений были

характерны и для ст. B_V (см. рис. 1а), расположенной в ~3.5 км к востоку от диффузора.

Статистические характеристики течений как векторного процесса оценивались по векторно-алгебраическому методу [1]. На рис. 6, в качестве примера, представлены характеристики тензора (инвариант I_1 , индикатор вращения течений и эллипс изменчивости), полученные по результатам

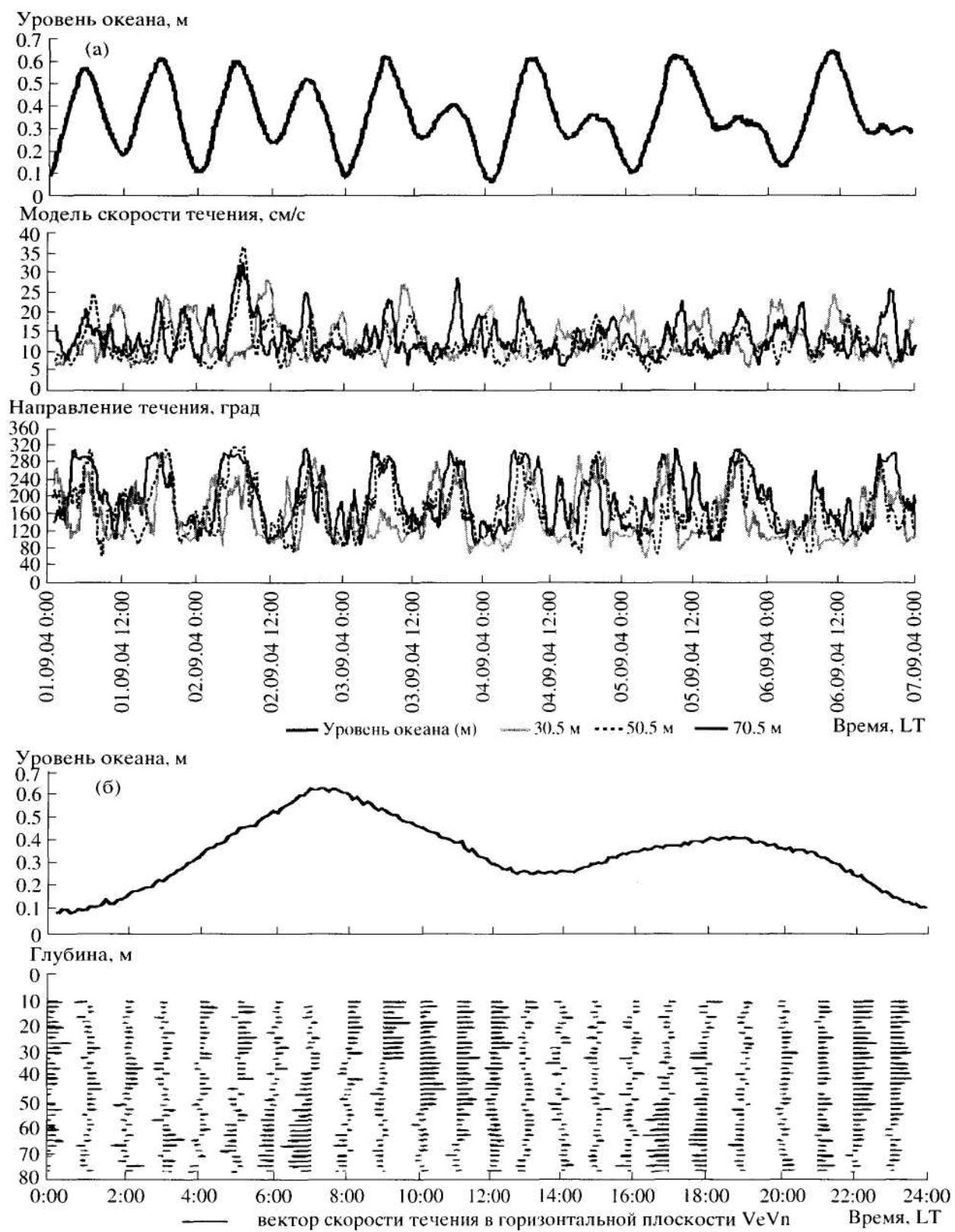


Рис. 5. Изменчивость течений под действием прилива: (а) – с 01 по 06.09.2004 г. (LT), (б) – 03.09.2004 г. (LT).

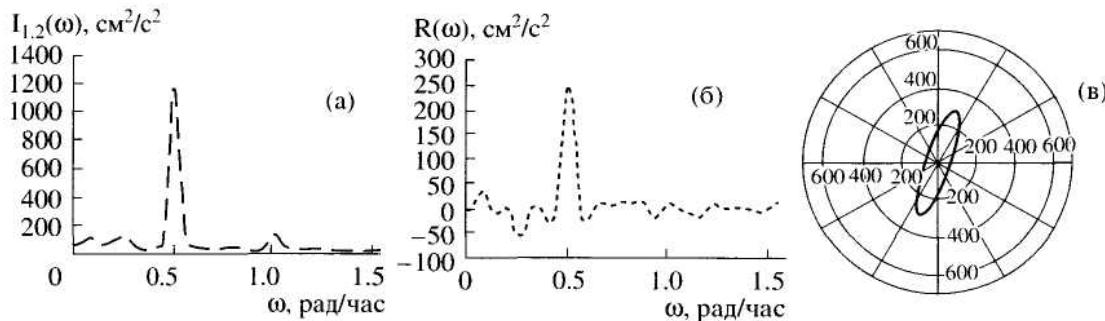


Рис. 6. Тензорные характеристики течений, полученные по результатам измерений с 10 по 21.09.2003 г. на ст. A_V :
(а) – линейный инвариант течений; (б) – индикатор вращения; (в) – эллипс изменчивости. Дискретность измерений 1 ч, горизонт ~30 м.

измерений течений на ст. A_V (вблизи диффузора, см. рис 1а) с 10 по 21 сентября 2003 г. (дискретность измерений 1 ч, горизонт 31.5 м).

Тензорные характеристики течений на одних и тех же горизонтах (в верхнем квазиоднородном слое, термоклине и нижних слоях) в 2002–2004 гг. были примерно одинаковые по всем станциям. В спектре течений – линейном инварианте (рис. 6а) для всех трех станций в рассматриваемом диапазоне частот доминировали составляющие с временными масштабами около 12 ч, близкие к периоду приливной волны M_2 . Другие составляющие вносили общий вклад менее 15% в общую кинетическую энергию. Особенности анизотропии течений были оценены по эллипсам дисперсии, которые показали, что большая ось эллипса совпадала с направлением среднего потока для данной точки. Сжатие эллипсов на приливной частоте варьиро-

валось от 0.11 до 0.13. Это свидетельствует о том, что доминировал перенос вод в направлении основного потока, иногда отклоняемый воздействием приливных движений.

Анализ спектров компонентов скоростей течений показал, что в относительно высокочастотной области с временными масштабами от полутора часов до полусуток имеются как волновые, так и турбулентные составляющие [13]. В спектрах скоростей течений на всех горизонтах доминируют приливные движения полусуточного и суточного периодов (см. рис. 7).

Для изучения особенностей течений были использованы также данные, полученные дрифтерами, которые запускались с судов на различные глубины во время экспериментов [12, 15, 17]. В процессе анализа проводилось сравнение траекторий дрейфа дрифтеров с направлениями доминирую-

Таблица 1. Статистические характеристики модуля скоростей течений, полученные по данным измерений датчиками ADP с 1 по 6 сентября в 2002–2004 гг.

Горизонт, м	Средняя скорость, см/с		Дисперсия, см/ с^2		MIN скорость, см/с		MAX скорость, см/с	
	2002 г.	2003 г.	2002 г.	2003 г.	2002 г.	2003 г.	2002 г.	2003 г.
у диффузора								
~20	34.2	14.6	119.8	73.8	0.9	0	77.6	65.5
~30	25.3	15.49	133.3	88.79	0.3	0.1	67.8	64.2
~50	13.3	15.2	63.8	90.4	0	0	50.8	75.1
~60	13.4	15.3	68.0	95.4	0.1	0.1	48.4	65.2
~70	–	15.2	–	103.1	–	0	–	71.9
~3.5 км к востоку от диффузора								
	2003 г.	2004 г.	2003 г.	2004 г.	2003 г.	2004 г.	2003 г.	2004 г.
~20	14.9	20.1	97.3	114.0	0.1	0.2	68.5	59.9
~30	14.5	19.5	92.1	107.8	0	0	62.1	60.8
~50	14.3	17.4	86.2	101.6	0.1	0.1	62	67.9
~60	14.4	18.9	83.3	126.8	0	0.4	62.4	79.8
~70	14.3	19.9	79.0	135.6	0.1	0.1	61.7	82.5

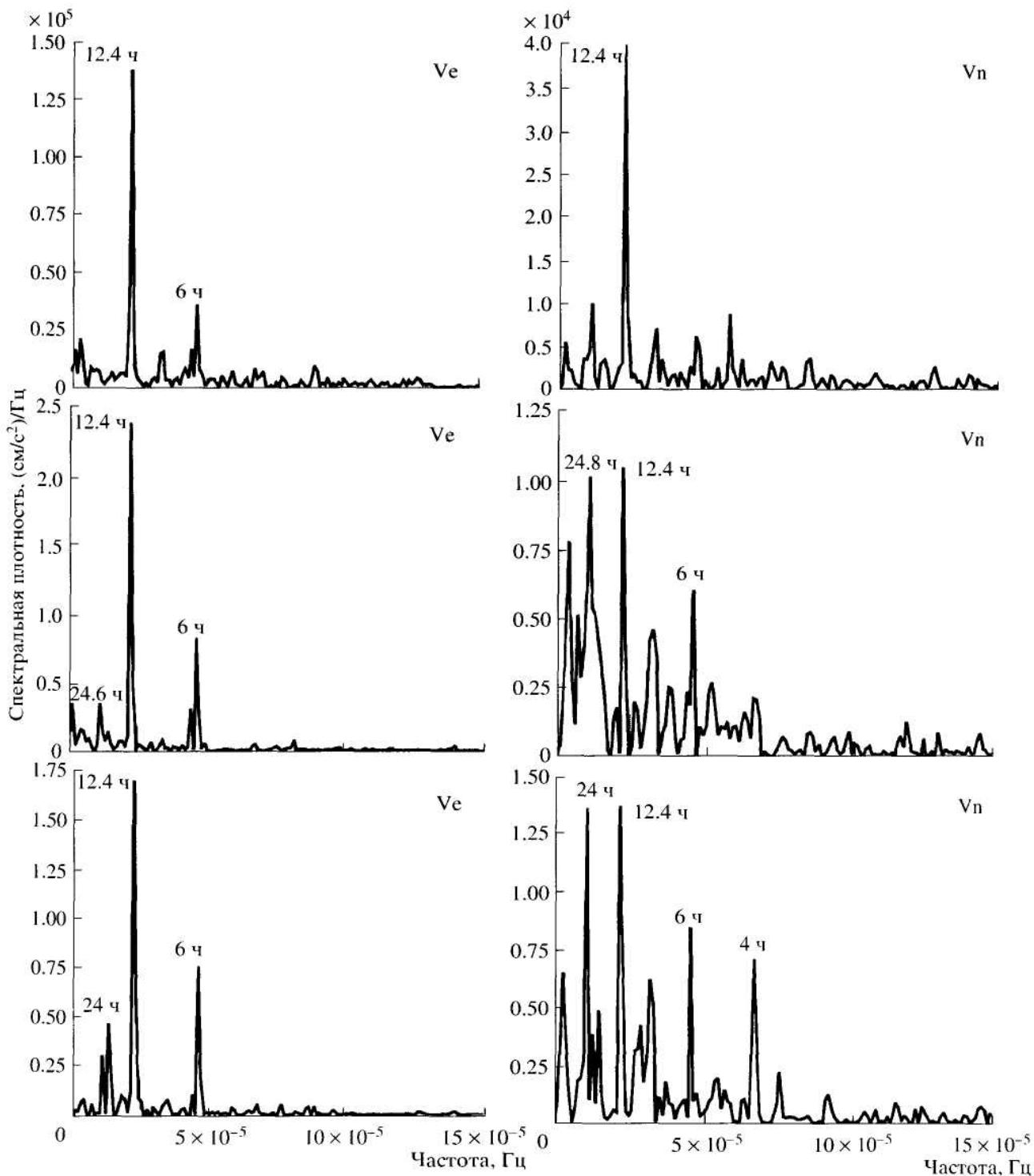


Рис. 7. Спектры горизонтальных компонентов скоростей течений, полученные по измерениям на ст. B_V с 20.08.2004 г. по 08.09.2004 г. Горизонты ~ 30 м (а), ~ 50 м (б), ~ 70 м (в). Дискретность измерений – 1 мин.

щих переносов по данным ADP-датчиков для согласованных глубин и моментов времени (рис. 8). Проводилось также сравнение средних значений скоростей течений по данным дрифтеров и датчиков ADP (табл. 2). Для более корректного анализа

характеристик полей течений использовалась информация о фазах приливных течений.

Средние значения скоростей движения дрифтеров для измеренных горизонтов (30 и 50 м) были достаточно близки и составили в среднем

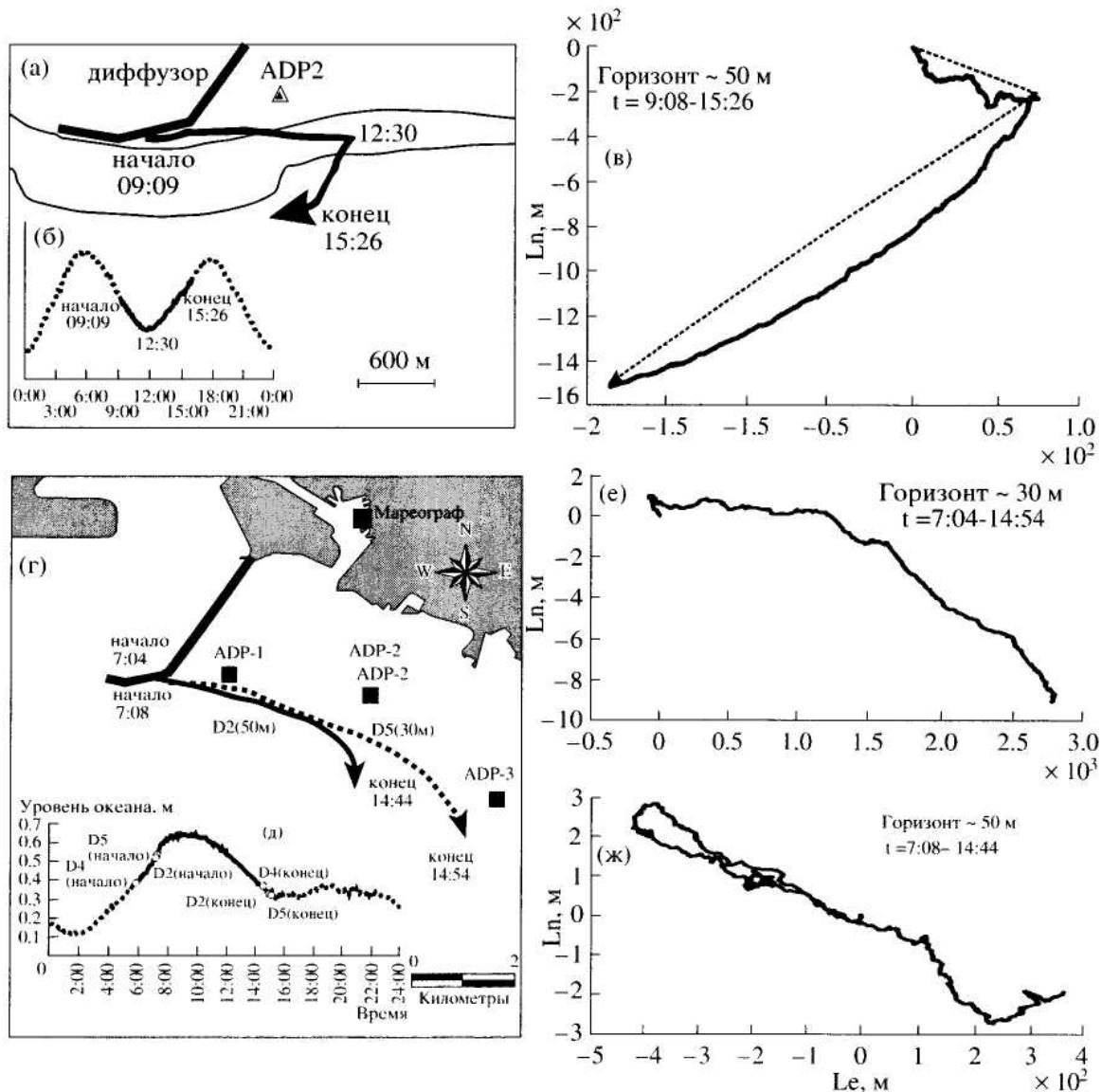


Рис. 8. Схемы движения дрифтеров 13.09.2003 г. (а) и 05.09.2004 г. (г), приливной режим во время движения дрифтеров 13.09.2003 г. (б) и 05.09.2004 г. (д), проекции прогрессивно-векторных диаграмм на плоскость VeVn, построенные по данным ADP-датчиков 13.09.2003 г. (в) и 05.09.2004 г. (е, ж).

15 см/с в 2003 г. и 12 см/с в 2004 г. Направления переноса по данным дрифтеров изменились в широких пределах от 90° до 270°. Изменения направлений движения дрифтеров были связаны с изменениями фазы приливного течения.

Совместный анализ направлений и скоростей течений, полученных с помощью датчиков ADP и дрифтеров, показал, что значения скоростей течений, измеренные этими приборами, согласуются, в то время как по направлениям течений наблюдаются некоторые различия.

На основании совместного анализа особенностей приливного режима (общей длительности фаз прилива и отлива, скоростей повышения или снижения уровня океана), а также распределения зна-

чений скоростей и направлений течений на разных горизонтах, в том числе при изменении направлений переноса водных масс по данным 2004 г., были выявлены некоторые зависимости распределения характеристик течений по глубине от действующих факторов, с учетом расположения станций, где проводились измерения (табл. 3).

В фазу отлива в 2004 г. в верхнем слое воды увеличение скоростей течений с глубиной было зафиксировано при большой длительности фазы, в условиях сильного воздействия распространения вод, связанного с проявлением отливных течений, и переноса водных масс в юго-восточном направлении или в сторону открытого океана. При меньшей же длительности фазы отмечалось уменьшение скоро-

Таблица 2. Средние значения скоростей движения дрифтеров и модулей скоростей течений, измеренные датчиками ADP для фиксированных временных интервалов. Направления движения дрифтеров и доминирующие направления переноса водных масс по данным датчиков ADP

Дата	Горизонт, м		Скорость, см/с		Направление, град	
	ADP	Дрифтер	ADP	Дрифтер	ADP	Дрифтер
04.09.2003 г.	30.5	30	16.42	21.70	257	270
	50.5	50	15.81	19.92	258	280
06.09.2003 г.	30.5	30	15.69	9.75	80/85	122/214
	50.5	50	12.58	13.55	130/85/100	270/107/190
11.09.2003 г.	30.5	30	17.33	14.19	214	180
	50.5	50	21.52	17.29	227	180
13.09.2003 г.	30.5	30	15.34	14.28	180	85
	50.5	50	15.67	10.17	166/247	90/220
14.09.2003 г.	50.5	50	10.19	12.85	180	120
24.08.2004 г.	30.5	30	10.09	9.67	122	111
	50.5	50	11.56	8.18	158	113
25.08.2004 г.	30.5	30	10.39	11.06	92	107
	50.5	50	14.03	10.67	136	112
26.08.2004 г.	30.5	30	10.11	10.01	133	108
	50.5	50	10.93	7.62	209	115/230
29.08.2004 г.	30.5	30	12.30	16.39	129	107
	50.5	50	8.83	12.81	167	105
30.08.2004 г.	30.5	30	10.10	12.12	187	108
	50.5	50	10.03	10.14	139/231	99/346
03.09.2004 г.	30.5	30	15.44	15.98	110/213	90/305
	50.5	50	12.23	13.17	140/194	90/305
04.09.2004 г.	30.5	30	10.51	13.19	135	100
	50.5	50	12.08	13.18	153	103

стей течений с глубиной, по-видимому, связанное с меньшим воздействием отлива.

В нижнем слое воды (ниже 70 м) при тех же условиях прослеживается только увеличения скоростей течений с глубиной на ст. B_v (см. рис. 1а), что связано с существенным влиянием отлива, а на ст. C_v (см. рис. 1а), как правило, – уменьшение их значений (влияние отлива здесь, вероятно, проявлялось меньше).

В прилив в верхнем водном слое, в условиях довольно длительной фазы, значительной скорости повышения уровня океана и переноса водной массы в основном в юго-восточном направлении, на ст. B_v отмечалось уменьшение скоростей течений с глубиной, тогда как на ст. C_v – их увеличение, явно из-за большего проявления влияния прилива.

В нижнем слое водной толщи, в условиях довольно длительной фазы и значительной скорости повышения уровня океана, существенная разница в распределении скоростей течений с глубиной была обусловлена изменением направления переноса

водных масс (с юго-восточного на юго-западное), в связи с чем на ст. B_v (см. рис. 1а) увеличение скоростей течений сменилось их уменьшением. На ст. C_v (см. рис. 1а), наоборот, уменьшение скоростей сменилось их увеличением. Это может являться следствием того, что процессы в верхнем и нижнем слоях воды определяются различными особенностями их динамического режима. На достаточно больших глубинах это может быть связано с общей циркуляцией вод вокруг островов, в том числе с проявлением пассатного течения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Анализ результатов измерений температуры в исследуемой акватории показал, что существовавший в бухте температурный режим в августе–сентябре 2003 г. значительно отличался от режима, наблюдавшегося в августе–сентябре 2002 и 2004 гг. На рис. 9, в качестве примеров, приведены карты вертикального распределения температуры воды в

Таблица 3. Скорости и направления течений, фаза приливного режима во время проведения экспериментов в 2004 г.

Дата, Время (LT), Фаза	Скорость изменения уровня	Характеристика	Горизонты, м							
			ст. B_V (ADP)				ст. C_V (ADP)			
			76.5	70.5	34.5	28.5	76.5	70.5	34.5	28.5
23.08.2004 10:36–19:12 отлив	4.7 см/ч	Скорость, см/с	13.3	11.0	13.7	13.1	16.2	23.3	25.1	22.1
		Направление, град	141.2	126.4	106.2	119.6	132.9	124.9	117.0	118.3
25.08.2004 05:42–13:00 прилив	9.2 см/ч	Скорость, см/с	13.7	11.7	15.2	15.6	14.6	18.1	23.2	22.7
		Направление, град	189.5	146.7	109.4	103.2	153.4	131.9	118.5	124.0
29.08.2004 03:24–09:36 отлив	5.4 см/ч	Скорость, см/с	12.6	9.8	11.0	14.1	16.0	16.5	15.8	16.6
		Направление, град	185.0	193.0	176.4	126.8	155.9	156.5	159.6	143.0
30.08.2004 17:00–23:18 отлив	10.2 см/ч	Скорость, см/с	17.9	11.4	10.9	15.2	17.7	18.6	18.0	24.2
		Направление, град	170.1	179.9	178.6	106.0	162.5	137.4	145.1	129.2
03.09.2004 07:30–14:12 отлив	5.4 см/ч	Скорость, см/с	13.8	13.0	13.9	19.1	24.4	22.1	23.6	23.8
		Направление, град	180.7	148.8	143.7	114.4	139.3	116.6	117.3	120.9
05.09.2004 02:12–09:42 прилив	7 см/ч	Скорость, см/с	14.1	20.4	9.8	11.0	16.0	9.7	19.2	15.6
		Направление, град	235.6	215.6	203.1	140.8	201.2	180.2	201.4	148.3

2003 и 2004 гг., а на рис. 10 – вертикальные профили температуры и солености в различных точках акватории в 2002–2004 гг.

Из приведенного на рис. 9а разреза температуры воды в координатах глубина–время на ст. B_T и вертикальных профилей, полученных на основании CTD-измерений (рис. 10в, 10г) видно, что в сентябре 2003 г. хорошо перемешанный квазиоднородный слой с близкими значениями температуры простирался до глубины ~70 м. Различия в температуре воды в поверхностных и глубинных (50–60 м) слоях не превышали 0.5°C. Слой термоклина большую часть времени располагался на глубинах 80–100 м, в то время как в 2002 и 2004 гг. термоклин располагался на глубинах 30–60 м. Средние значения температуры воды в поверхностных слоях большую часть времени составляли ~26.5°C, а в конце сентября повысились до 27°C. Дисперсия флуктуаций температуры в 2003 г. на нижних горизонтах 40–68 м превышает флуктуации в верхних слоях водной толщи. По данным измерений на разных станциях в исследуемый период времени на глубинах 20–60 м происходили периодические изменения температуры воды, обусловленные приливо-отливными течениями.

В 2002 и 2004 гг. в акватории б. Мамала (о. Оаху, Гавайи) наблюдался сезонный термоклин, положение которого изменялось в диапазоне 30–60 м (см. рис. 9б, 10а, 10б, 10д, 10ж). В период проведения натурных экспериментов в 2004 г. температура водной толщи на глубинах 28–70 м вблизи диффузора изменялась примерно от 22 до 28°C. Наибольшие

изменения температуры от 24 до 28°C происходили на горизонте, близком к слою скачка (~50 м), и на горизонте ~70 м (см. рис. 9б). Статистические характеристики температуры воды на различных горизонтах в 2004 г. приведены в табл. 4. Существенные изменения температуры воды происходили в течение всего периода проведения комплексных экспериментов в 2004 г. и достигали величины $\Delta T = 3^{\circ}\text{C}$ на глубине 28 м и $\Delta T = 14^{\circ}\text{C}$ на глубине 170 м. При этом в термоклине наблюдалась тонкая ступенчатая структура со слоями толщиной до нескольких сантиметров, обусловленная перемешиванием и внутренними волнами. Расчет частоты Вийя-сяла–Брента N показал, что минимальный период внутриволновых колебаний в ядре термоклина имеет порядок минуты.

Во время экспериментов, проводившихся в 2002 и 2004 гг., термоклин, располагавшийся на глубине 30–60 м, создавал “запирающий” слой для стоков. Сбрасываемые воды, обладающие меньшей плотностью по сравнению с окружающими океаническими водами, под действием сил плавучести поднимались в верхние горизонты, достигали слоя скачка (запирающего слоя) и “растекались” по нему. В результате этого облако сбрасываемых вод могло принимать так называемую “трибовидную” форму, что подтверждается результатами гидрооптических [2, 5] и микроструктурных [15, 17, 20] измерений. Этот слой отсутствовал во время экспериментов 2003 г., так как термоклин располагался на глубинах 70–100 м, то есть ниже диффузора.

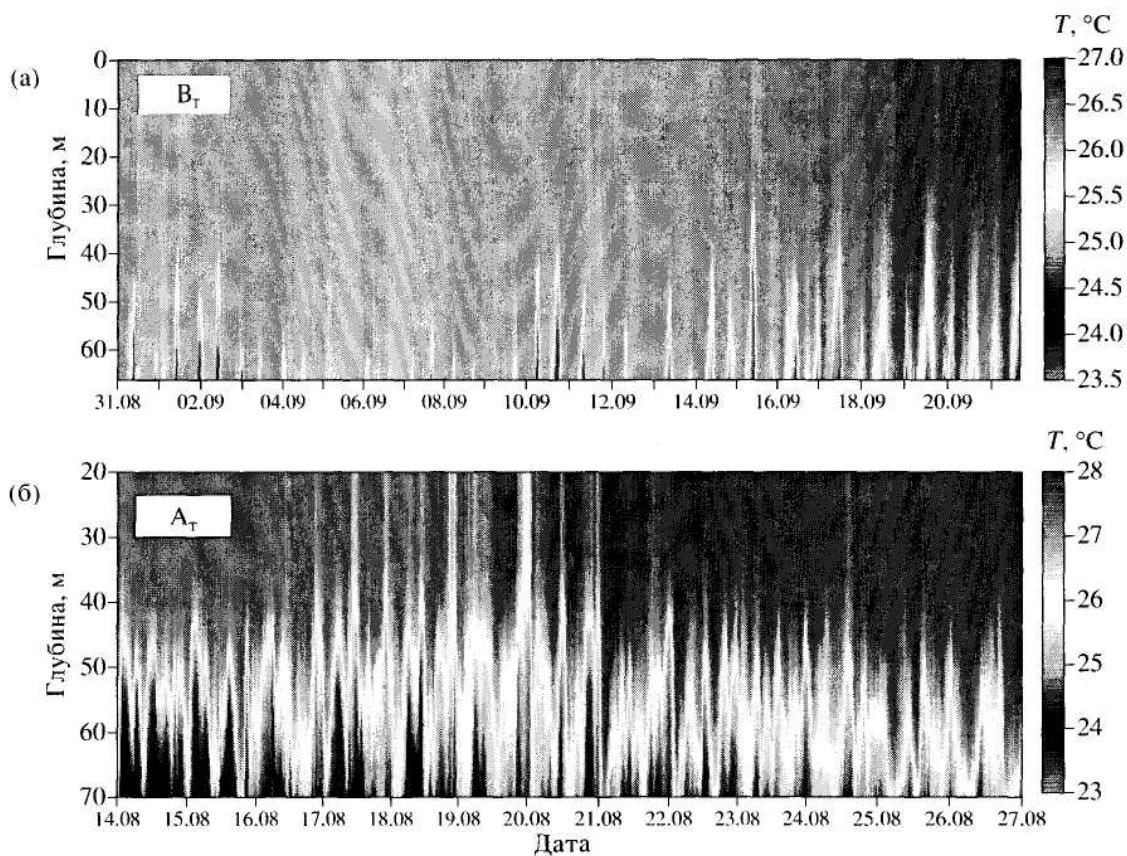


Рис. 9. Разрезы температуры в координатах время-глубина в слое 0–70 м, полученные по данным термокос: (а) – на ст. B_T с 31.08.2003 г. по 22.09.2003 г.; (б) – на ст. A_T с 14.08.2004 г. по 27.08.2004 г.

На рис. 11 приведены графики изменчивости температуры на различных горизонтах под действием прилива в 2004 г. Из этого рисунка следует, что за исследуемый период происходили существенные периодические изменения температуры воды во времени. Основным периодом этих изменений температуры является 12-часовой интервал, что связано с полусуточным приливом. Вычисленные спектры флуктуаций температуры подтвердили сильное влияние приливных течений на изменения температурного режима в б. Мамала.

На рис. 12 приведены спектры температуры, вычисленные по данным измерений 2004 г. Анализ этих спектров показал, что на ст. A_T (см. рис. 1а) на горизонтах ~50 и ~70 м максимум спектральной энергии отмечался на частоте полусуточных колебаний (см. рис. 12). В спектрах, полученных по данным измерений на других станциях, полусуточный максимум проявлялся и на других горизонтах.

Анализ всех спектров температуры, построенных по данным за исследуемый период, показал,

Таблица 4. Статистические характеристики температуры воды на ст. A_T и D_T в 2004 г. Дискретность измерений – 1 мин

Горизонт, м	Количество значений	M , °C	Медиана, °C	MIN, °C	MAX, °C	D , ($^{\circ}$ C) 2	σ , °C
Станция A_T (14–27 августа 2004 г.)							
33	18741	27.45	27.57	25.34	27.88	0.11	0.34
51	18741	26.12	26.30	23.57	27.79	1.04	1.02
72	18741	23.97	23.92	21.96	27.24	0.55	0.74
Станция D_T (23 августа по 7 сентября 2004 г.)							
28	21498	27.66	27.4	24.38	28.01	0.08	0.29
49	21498	26.46	26.56	23.26	27.82	0.745	0.86
72	21498	24.41	24.41	22.24	26.68	0.59	0.77

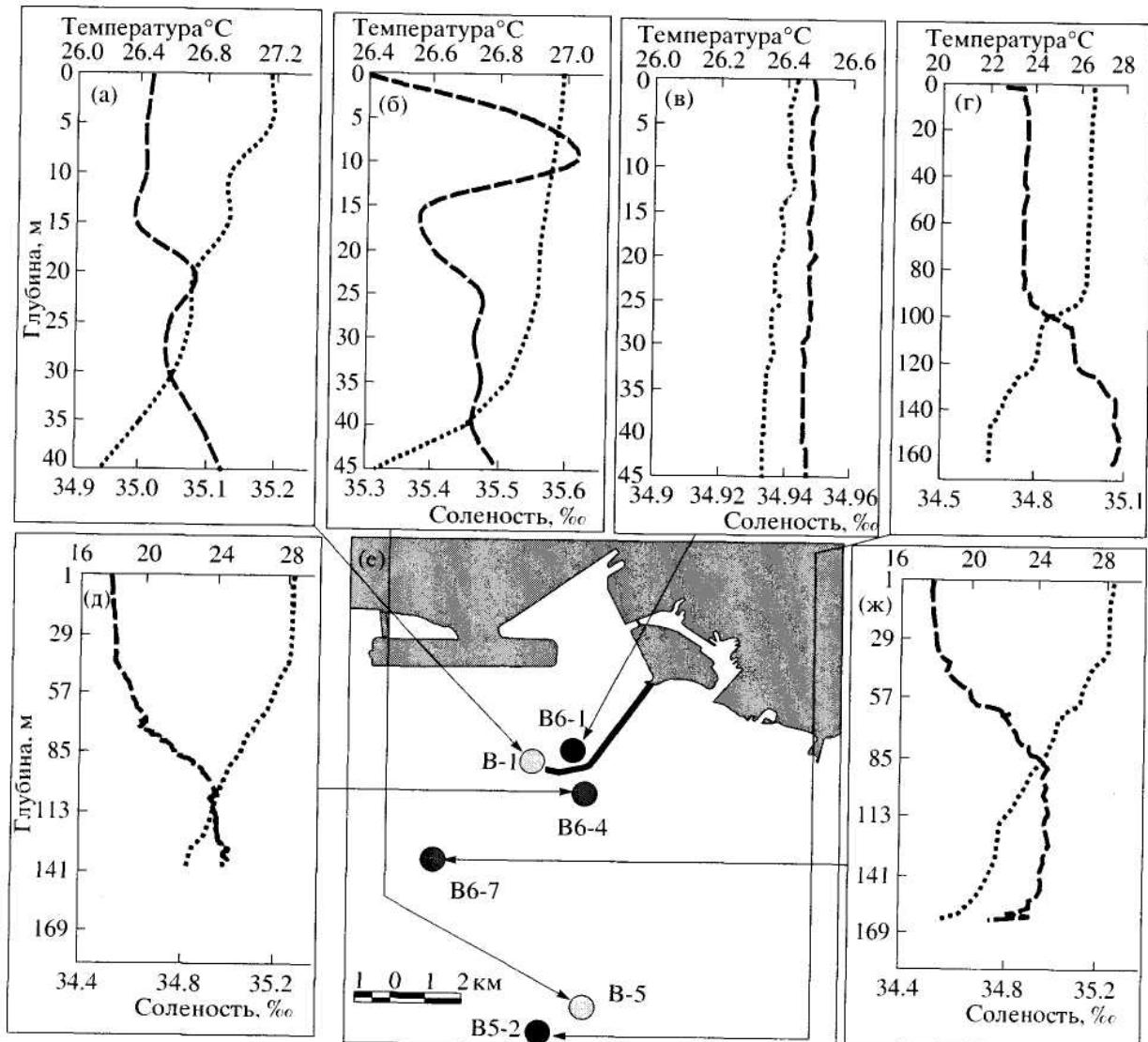


Рис. 10. Вертикальные профили температуры и солености, построенные по результатам измерений: 02.09.2002 г. в точках B-1 (а) и B-5 (б), 06.09.2003 г. в точках B6-1 (в) и B5-2 (г), 03.09.2004 г. в точках B6-4 (д) и B6-7 (ж). Схема расположения точек измерений (е).

что основные максимумы спектральной энергии наблюдаются на частотах, соответствующих периодам полусуточного и суточного приливов, а также периодам инерционных колебаний (несколько суток). Выявлены также вторичные максимумы в области более высоких частот, соответствующих периодам 4–8 ч. Эти максимумы обусловлены более короткопериодными внутренними волнами, возникающими при распаде длинных приливных волн на бровке шельфа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННИХ ВОЛН

Из открытой части исследуемой акватории на материковый склон набегает длинная приливная ба-

ротропная волна [18]. Приливные течения, вызываемые этой волной, встречая на своем пути препятствие в виде материкового склона, получают вертикальные составляющие. Периодически изменяющиеся вертикальные составляющие течений вызывают вертикальные колебания изопикнических поверхностей, и за счет этого механизма возбуждаются внутренние волны приливного периода. По мере распространения волн они будут затухать за счет опрокидывания волн, генерации более короткопериодных волн и турбулентной вязкости [3, 4, 19].

Таким образом, в шельфовой зоне под действием баротропного прилива возбуждаются крупномасштабные внутренние волны приливного периода, которые в дальнейшем разрушаются, передавая свою энергию волнам меньшего размера.

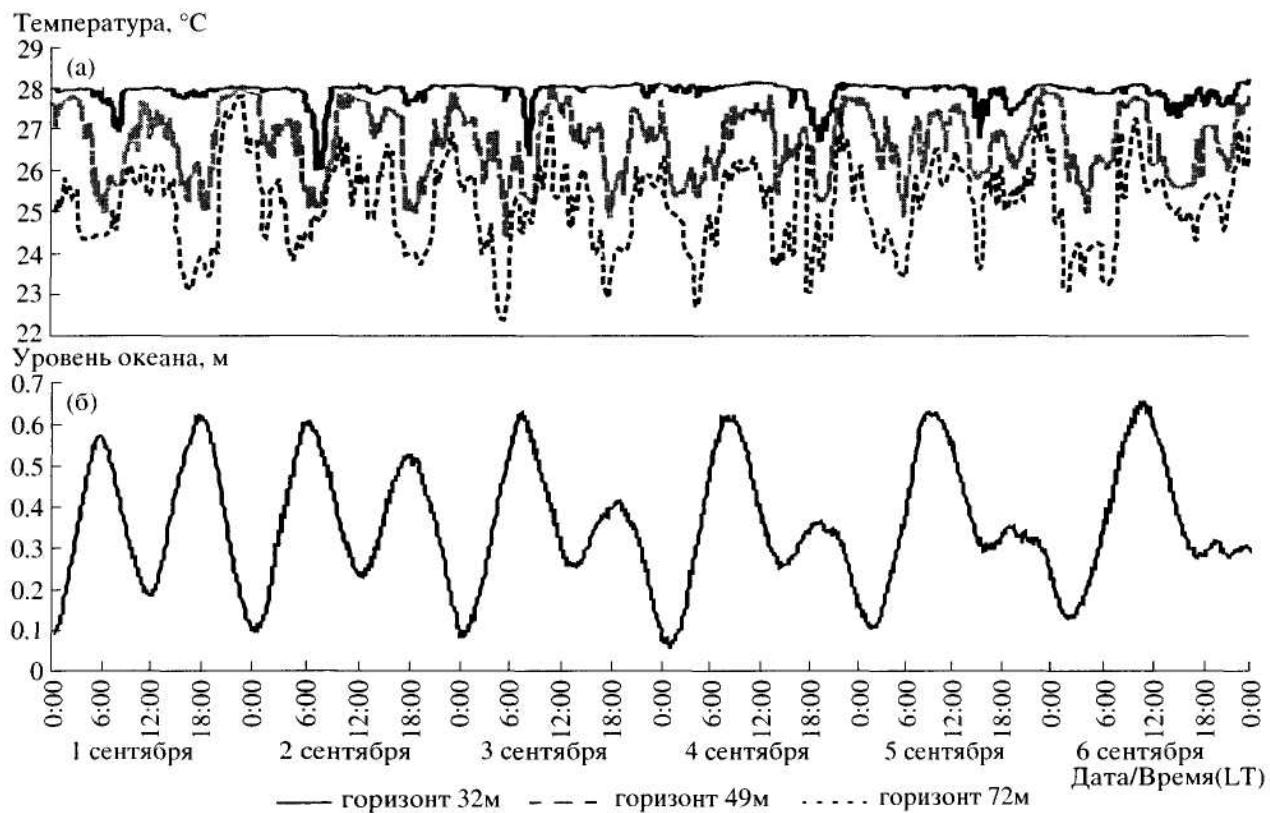


Рис. 11. Изменчивость температуры во времени на различных горизонтах (а) под действием прилива (б) в период с 01 по 06.09.2004 г.

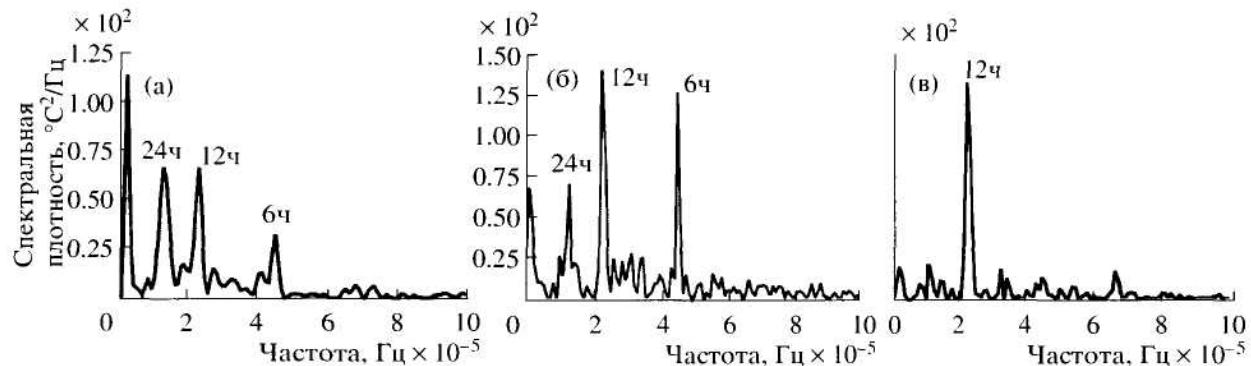


Рис. 12. Спектры температуры, полученные по измерениям на ст. А_T с 14 по 27.08.2004 г. на горизонтах ~30 м (а), ~50 м (б), ~70 м (в). Дискретность измерений 1 мин.

Приведем далее оценку внутриволновых колебаний по глубинам залегания изотерм (ГЗИ) за разные годы. Анализ графиков глубины залегания изотерм 25–27°C в б. Мамала (см. рис. 13) показывает, что амплитуда внутриволновых колебаний с временными масштабами полусуточных приливов достигает 40–50 м.

Отметим, что для корректной оценки направления распространения внутриволновых волн мы не располагали достаточным количеством станций, установленных в виде треугольника и на доста-

точно малом расстоянии друг от друга. Можно надежно выделить лишь характеристики доминирующих здесь приливных внутренних волн с временными масштабами около 24 ч, 12 ч, 6 ч, а также короткопериодных внутриволновых волн с временными масштабами от 4 ч до 3 мин.

В исследуемом регионе отмечался статистический ансамбль внутриволновых волн со случайными фазами и амплитудами. В высокочастотной области спектра с временными масштабами, меньшими 3 ч, в исследуемом диапазоне частот отсутствовали зна-

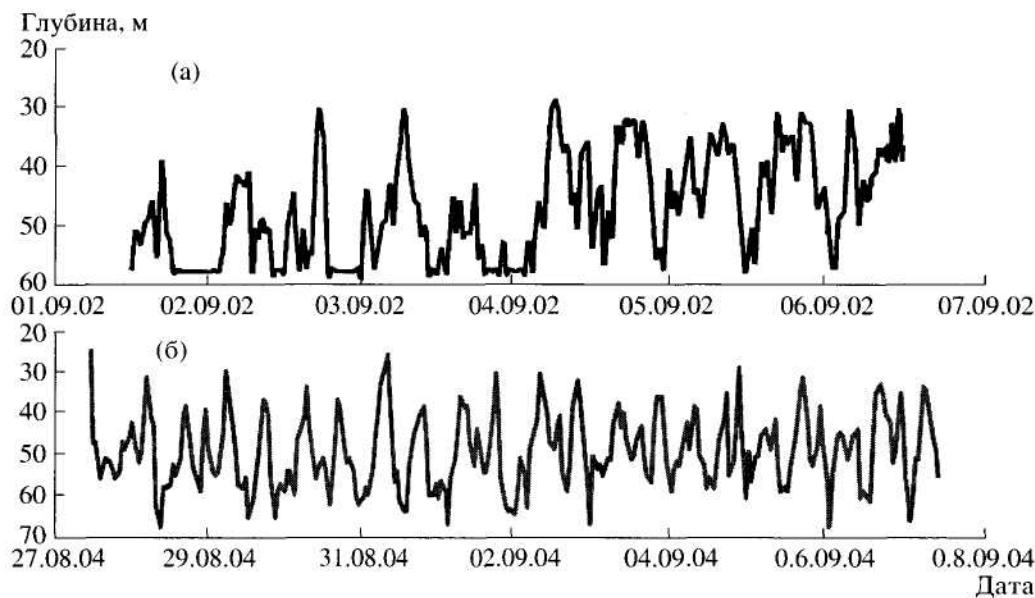


Рис. 13. Вариации глубин залегания изотермы 25°C в 2002 г. (а) и 27°C в 2004 г. (б) на станциях вблизи диффузора.

чимые периодические флуктуации, а спад спектра имел наклон ω^{-2} . Это является типичным для спектра внутренних волн в океане [14].

Как показали наши расчеты, поведение спектров внутренних волн (глубины залегания изотерм), в общем, схожи с особенностями спектров скоростей течений в масштабах полусуточных внутренних волн. Однако пики на суточной и приливной полусуточной гармониках течений были выражены более четко, чем в спектрах ГЗИ, поскольку изменчивость течений на этих частотах определялась не только модулем, но и вращением вектора. В случае, когда термоклин выражен достаточно резко (как в 2002 и 2004 гг.), доминирует низшая нормальная мода. Об этом можно судить по когерентности колебаний на различных горизонтах. Взаимный спектральный анализ между тремя станциями, на которых были расположены термодатчики, позволил выявить тесную корреляцию только на частоте, соответствующей полусуточным приливам. Взаимная корреляция ГЗИ для разных станций достаточно высока (более 0.6), а разность фаз близка к нулю. По полученным спектрам оценены средние высоты внутренних волн первой моды (полусуточной приливной), которая оказалась равной 8 м, а максимальные значения волн этой моды достигают 30 м.

Далее рассмотрим трехмерные частотно-временные спектры внутренних волн по данным колебаний ГЗИ за 2002–2004 гг. (рис. 14). Схема размещения станций приведена на рис. 1.

Из рис. 14 видно, что в спектрах внутренних волн в рассматриваемом диапазоне частот доминируют полусуточные и суточные колебания. Следует отметить, что при возрастании энергии полусуточных внутренних волн уменьшается вклад низ-

кочастотных внутриволновых компонентов, а при ослаблении полусуточных внутренних волн наблюдается формирование относительно высокочастотных (с периодами, меньшими 12 ч) и еще более высокочастотных гармоник внутренних волн. Таким образом, происходит определенная “перекачка” энергии из области одних частот в другие. В более высокочастотной области спектра с временными масштабами, меньшими 3 ч, отсутствуют значимые периодические флуктуации. В области частот 5×10^{-3} – 5×10^{-2} с $^{-1}$, т.е. с периодами несколько минут, имеются небольшие максимумы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа результатов обработки данных, полученных при экспериментальных исследованиях гидрофизических процессов, проведенных в 2002–2004 гг. в прибрежной акватории б. Мамала (о. Оаху, Гавайи), установлено:

1. В период проведения экспериментов преобладали ветры бризового характера (с острова и на остров в разное время суток) и пассатные. Преимущественными направлениями ветра, зафиксированными на наземных станциях, являлись направления 0°–80° со средними скоростями ~6 м/с и максимальными до 11.5 м/с. Значения скоростей ветра, зарегистрированные на судах, составляют в среднем 6–8 м/с и имели тенденцию к увеличению по мере удаления от диффузора в мористую зону. Максимальные скорости ветра достигали величин ~11 м/с. Преобладающим направлением ветра являлось северо-восточное.

2. Исследования характеристик полей течений в районе глубинного сброса в б. Мамала во время про-

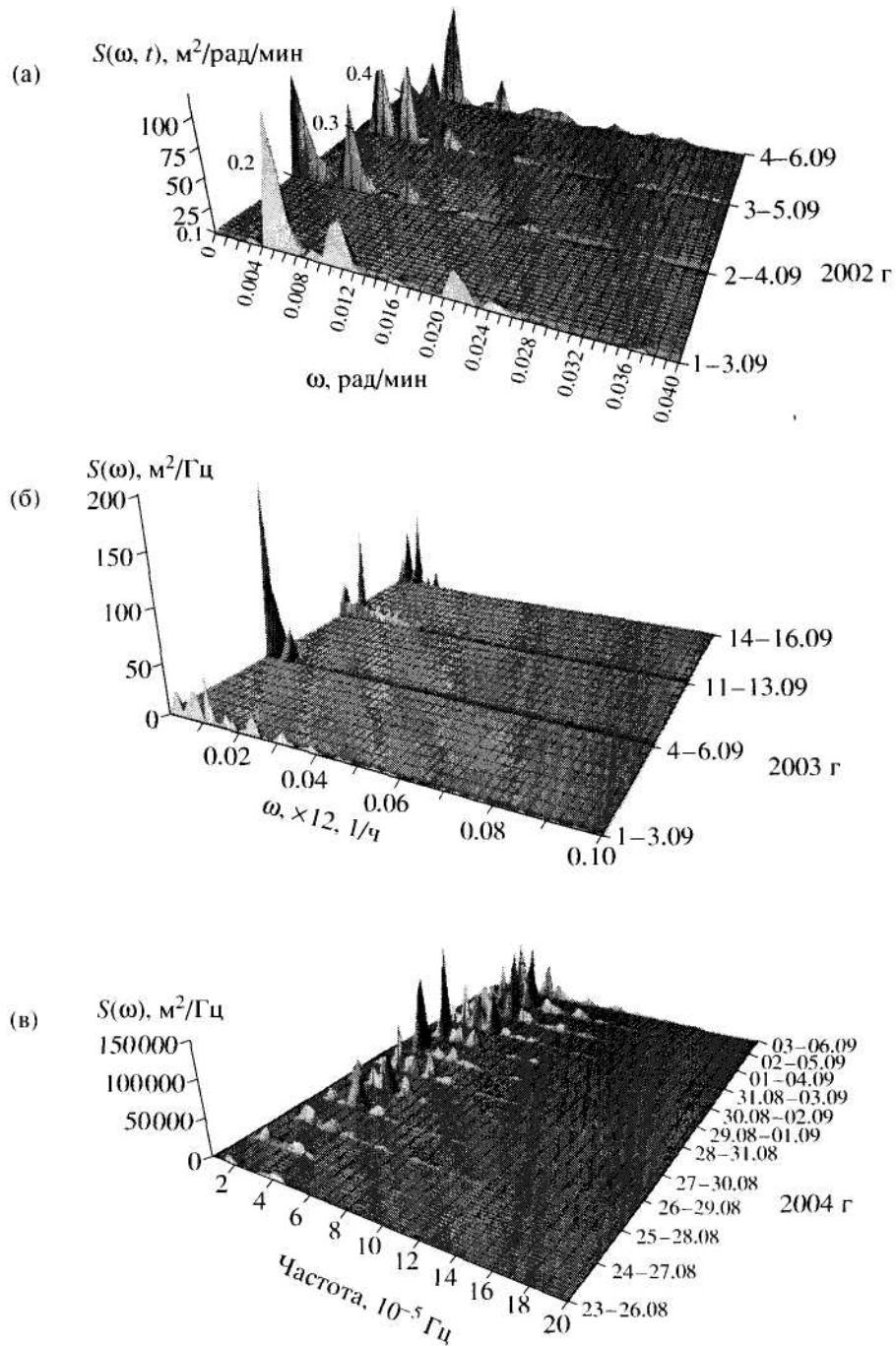


Рис. 14. Трехмерные частотно-временные спектры внутренних волн, построенные по данным колебаний глубины заглаживания: (а) – изотермы 25°C на ст. А_T в 2002 г.; (б) – изотермы 26.3°C на ст. А_T в 2003 г.; (в) – изотермы 26°C на ст. D_T в 2004 г.

ведения комплексных экспериментов показали, что доминирующим направлением переноса водных масс являлось направление 220° (на юго-запад) с наклоном общего потока к свалу глубин. В районе станции, расположенной в 3 км к востоку от диффузора, наблюдалась сильная изменчивость поля течений. При общей тенденции переноса вдоль берега

отмечались квазиволновые колебания направления поля течения от юго-западного к юго-восточному.

3. У горизонтальных компонентов вектора скорости течений на всех горизонтах прослеживалась изменчивость, обусловленная приливными движениями с периодом, характерным для полусуточной приливной волны M_2 . Средние значения модуля

скорости течений для всей исследуемой толщи воды составляли 15–20 см/с, максимальные достигали 48.4–82.5 см/с.

4. Температурный режим при проведении натурных экспериментов в разные годы был различным. В сентябре 2003 г. хорошо перемешанный квазиоднородный слой с близкими значениями температуры простирался до глубины ~70 м. Различия в температуре воды в поверхностных и глубинных (50–60 м) слоях не превышали 0.5°C. Средние значения температуры воды в приповерхностных слоях в 2003 г. большую часть времени составляли величины ~26.5°C, а в конце сентября ~27°C. Слой термоклина в 2003 г. располагался в основном на глубинах 80–100 м, в то время как в 2002 и 2004 гг. термоклин поднимался до глубин 30–60 м. За весь период измерений происходили периодические изменения температуры воды, обусловленные приливо-отливными течениями.

5. При анализе спектров глубин залегания изотерм установлено наличие интенсивных внутренних волн приливного характера суточного и полусуточного периодов. Внутренние волны полусуточного периода во время проведения экспериментов имели максимальную высоту до 50 м, а среднюю – порядка 8–9 м.

6. Полученные результаты позволяют проанализировать общую картину гидрофизических процессов в исследуемой прибрежной акватории для оценки степени и характера антропогенных воздействий на нее, а также используются при анализе и интерпретации результатов аэрокосмического мониторинга.

Авторы выражают искреннюю благодарность всем участникам эксперимента: Р.Н. Килеру, К. Гибсону, Дж. Бурдете, Б. Фишеру, Х. Прандке, Ф. Волку, Р. Льюику, М. Тружилло, а также командам судов, привлекаемых к проведению экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бельшев А.П., Рожков В.А., Клеванцов Ю.П. Вероятностный анализ морских течений. Л.: Гидрометиздат, 1983. 264 с.
- Бондур В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии // Новые идеи в океанологии, т. 1. Физика, Химия, Биология. М.: Наука, 2004. 352 с.
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В. Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исслед. Земли из космоса. 2001. № 6. С. 59–73.
- Бондур В.Г., Морозов Е.Г., Бельчанский Г.И., Гребенюк Ю.В. Радиолокационная съемка и численное моделирование внутренних приливных волн в шельфовой зоне // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 2. С. 51–63.
- Бондур В.Г., Килер Р.Н., Старченков С.А., Рыбакова Н.И. Мониторинг загрязнений прибрежных акваторий океана с использованием многоспектральных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 6. С. 42–49.
- Бондур В.Г., Журбас В.М., Гребенюк Ю.В. Математическое моделирование турбулентных струй глубинных стоков в прибрежные акватории // Океанология. 2006. Т. 46. № 6. С. 805–820.
- Веденников В.И., Бондур В.Г., Виноградов М.Е., Лэндри М.Р., Цидилина М.Н. 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.
- Горшков С.Г. (отв. ред). Атлас океанов. Тихий океан. М.: Главное управление авигации и океанографии Министерства обороны СССР, 1974.
- Долотов Ю.С. Проблемы рационального использования и охраны прибрежных областей Мирового океана. М.: Научный мир, 1996. 304 с.
- Израэль Ю.А., Цыбань А.В. Антропогенная экология океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 528 с.
- Atlas Hawai'i. Third Edition // Eds. Juvik S.P., Juvik J.O. University of Hawai'i Press, Honolulu, 1998. 334 p.
- 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 International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2006. P. 192–195.
- 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, 2–5 July 2003, Petrozavodsk, Russia. P. 98–103.
- Garrett C.J.R., Munk W.H. Internal waves at the ocean // Annual Review of Fluid Mechanics. 1979. V. 11. P. 339–369.
- Gibson C.H., Bondur V.G., Keeler R.N., Leung P.T. Energies of the Beamed Zombie Turbulence Maser Action Mechanism for Remote Detection of Submerged Oceanic Turbulence // J. of Applied Fluid Mechanics. 2006. V. 1. № 1. P. 11–42.
- Keeler R.N., Bondur V.G., Vithanage D. Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // Sea Tech. 2004. 45. P. 53–58.
- Keeler R.N., Bondur V.G., Gibson K.H. Optical satellite imagery detection of internal wave effects from a submerged turbulent outfall in the stratified ocean // Geoph. Res. Lett. V. 32. L12610. doi:10.1029/2005GL022390.
- Mernfield M.A., Eich M.L., Alford M.H. Structure and variability of semidiurnal internal tides in Mamala Bay, Hawaii // Geoph. Res. 2004. V. 109. C05010. doi:10.1029/2003jc002049.
- Petrenko A.A., Jones B.H., Dickey T.E., Hamilton P. Internal tide effects on a sewage plume at Sand Island, Hawaii. Conf. Shelf. 2000. 20. P. 1–13.
- Wolk F., Prandke H., Gibson C.G. Turbulence Measurements Support Satellite Observations // Sea Tech. 2004. 45. P. 47–52.

Study of Hydrophysical Processes during the Monitoring of Anthropogenic Influences on Coastal Water Areas (the Case of Mamala Bay, Oahu Island, Hawaii)

**V. G. Bondur, N. N. Filatov, Yu. V. Grebenyuk, Yu. S. Dolotov, R. E. Zdorovenkov,
M. P. Petrov, M. N. Tsidilina**

The paper presents the main data processing results of researches of hydrophysical processes during the comprehensive monitoring of anthropogenic influences on coastal water area of Mamala Bay (Oahu, Hawaii). The results from hydrophysical measurements in August–September 2002–2004 using stationary buoys, dropped and towed ship sensors were used as initial data. According to these measurements, space-time, statistical, and spectral characteristics of various hydrophysical parameters of marine environment in the Mamala bay water area have been calculated, including 3D current velocity vector components; spectra of various components of current velocities; temperature fluctuation spectra; internal wave characteristics. Temperature field variations, the relationship of flood-and-ebb phenomena with temperature changes and internal wave fluctuations have been analyzed. The materials and methods of oceanographic researches, results of the analysis of meteorological and hydrological conditions are presented. The obtained results are used for the comprehensive analysis of space and sea truth data.