

УДК 551.465,551.466

ГЕНЕРАЦИЯ ИНЕРЦИОННО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН НА ОСТРОВНОМ ШЕЛЬФЕ

© 2015 г. В. Г. Бондур*, К. Д. Сабинин**, Ю. В. Гребенюк*

* Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”

105064 Москва, Горюховский пер., 4

E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

E-mail: ksabinin@yandex.ru

E-mail: grebenyk@gmail.com

** Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева

117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 29.04.2014 г., после доработки 12.08.2014 г.

Анализируются данные по течениям у о. Оаху (Гавайи), измеренные с помощью донных акустических профилометров течений, которые были установлены на краю шельфа в заливе Мамала. Изменения амплитуды инерционно-гравитационных волн (ИГВ) сопоставляются с изменениями фоновых низкочастотных течений с помощью специально разработанных показателей изменений величины и направления течений. Установлено, что в случаях локальной генерации ИГВ наблюдается хорошая связь амплитуды волн с изменчивостью фоновых течений, особенно если течения вращаются по часовой стрелке. Такая связь ослабевает в присутствии волн, приходящих от удаленных источников, которыми, в частности, могли быть ИГВ, возбужденные вытекающими из глубоководного диффузора струями сбрасываемых вод. Полученные результаты показывают, что ИГВ могут быть связаны не только с ветровым воздействием, но и непосредственно с любой перестройкой поля течений внутри океана.

Ключевые слова: инерционно-гравитационные волны, профилометр, течения, шельф.

DOI: 10.7868/S0002351515020030

ВВЕДЕНИЕ

Инерционные колебания слоев воды и возбуждаемые ими инерционно-гравитационные волны возникают при нарушении баланса сил, действующих на частицы жидкости. Основной причиной таких явлений считается действие ветра, в связи с чем связано наблюдаемое в океане доминирование распространения энергии ИГВ из верхних слоев вниз [1]. Некоторые специфические черты инерционных колебаний, обнаруженные в ходе экспериментальных измерений на краю островного шельфа залива Мамала (о. Оаху), были рассмотрены в [2]. Наблюдались аномальные характеристики инерционных колебаний — необычная форма годографов с часто встречающимися случаями левого вращения инерционных течений и существенные изменения периода колебаний. Эти аномалии связаны с сильными и неоднородными в пространстве и во времени течениями в районе экспериментов, описание которых дано в [3–6] и в кратком виде разделе 1. Раздел 2 посвящен анализу экспериментальных данных, а раздел 3 — обсуж-

дению полученных результатов, касающихся причин возбуждения ИГВ в 2003 и 2004 гг., когда проводились измерения.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На Гавайском шельфе в акватории бухты Мамала (о. Оаху, США) в течение ряда лет (2002–2004 гг.) проводились комплексные исследования антропогенных воздействий на экосистемы прибрежных акваторий, вызванных заглубленными стоками [3–7]. В ходе этих экспериментов в течение длительного времени измерялись характеристики течений с помощью донных акустических доплеровских профилометров течений ADP (3 луча) и температуры морской воды с использованием заякоренных термогирлянд [2–4]. Параллельно с гидрофизическими измерениями проводились также космические съемки морской поверхности с помощью оптических и радиолокационных средств, установленных на различных спутниках, позволявшие исследовать поверхностные

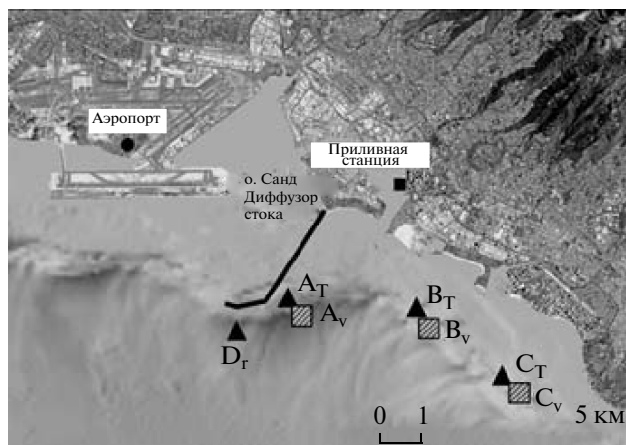


Рис. 1. Схема расположения в бухте Мамала станций измерения скоростей течений A_V , B_V , C_V .

проявления глубоководных стоков, результаты которых обобщены в работах [3, 5].

Измерения трех составляющих вектора течений проводились на трех станциях А, В, С, расположенных вдоль изобаты 70 м (рис. 1). Станции измерений в 2003 г. в тексте обозначаются A_3 , B_3 , в 2004 г. — B_4 , C_4 . Расстояние между соседними станциями составляло 2 км и 2.5 км. Характеристики течений измерялись на глубинах от 4 м до 76 м с дискретностью по глубине 2 м, с дискретностью по времени — 1 мин. [3, 4, 6]. Измерения проводились в летний период года (август–сентябрь). Длина рядов измерений скоростей течений составляла 512 ч в 2003 г. и 385 ч в 2004 г.

Следует отметить, что измерители течений в бухте Мамала были расположены на очень крутом откосе дна (уклоны достигают десятых долей градуса), что представляет большое препятствие для возникновения инерционных волн. Даже в верхнем 20-м слое волны, скорее всего, отражаются, хотя исчезающая в верхнем слое стратификация не способствует наклону инерционных волн, а превышение эффективной инерционной частоты над планетарной на шельфе вообще не “пускает” волны к берегу.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В период проведения измерений в 2003 г. вблизи Гавайских островов 1 сентября прошел тайфун *Ijona*, возбудивший сильные течения в верхнем слое и в меньшей степени во всей толще вод на краю шельфа. Вследствие этого были интенсифицированы и инерционные колебания, амплитуда которых в 2003 г. была в несколько раз больше, чем в 2004 г., более спокойном в ветровом отношении. Непосредственным следствием тайфуна явились сильные (до нескольких дм/с) течения в верхнем слое океана, ежесуточные сглаженные

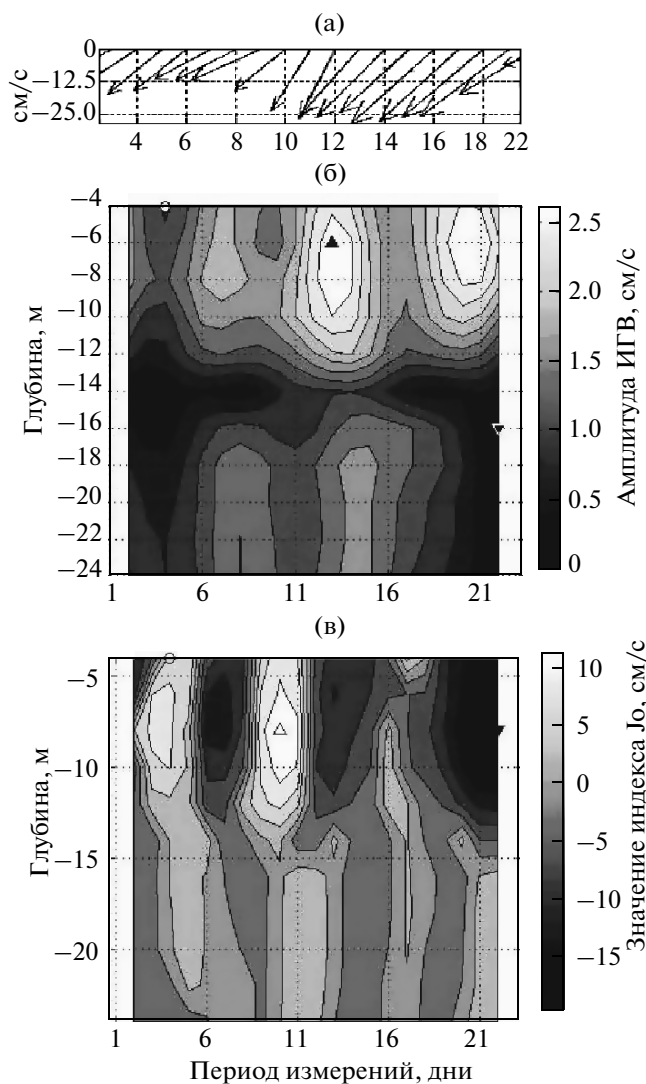


Рис. 2. Ежесуточные векторы низкочастотных течений станции А в 2003 г. на горизонте 10 м (а), амплитуда инерционных волн (в градациях уровень серого) (б) и значения индекса J_0 (уровень серого) (в). Экстремумы амплитуды ИГВ (3 и 0 см/с) и индекса J_0 (15 и -20 см/с) обозначены треугольниками.

значения которых на горизонте 10 м показаны стрелками на рис. 2а. Течения резко ослабевали до нескольких см/с на глубинах более 12 м, сохраняя преобладание западной составляющей направлений. Похожее воздействие тайфуна на характеристики течений рассмотрено также в [8].

На рис. 2б показана амплитуда ИГВ, под которой мы будем понимать среднеквадратические колебания течений в частотном диапазоне ± 0.03 – 0.005 ц/ч, а на рис. 2в — показатель изменения фоновых течений, который определим некоторым специально разработанным индексом J_0 (см. ниже). Фоновыми будем считать течения, сглаженные фильтром Баттерворда 3-го порядка с частотой

Таблица 1.

Станции	JA	JoA	$\langle A \rangle$ дм/с	max A	stdJo	n
A3	0.47	-0.26	0.012	0.0288	0.0566	735
B3	0.63	-0.30	0.090	0.0267	0.0482	740
B4	0.20	0.02	0.084	0.0225	0.0283	666
C4	0.04	0.11	0.074	0.0158	0.0331	555

Примечание. JA – коэффициент корреляции между модулем Jo и амплитудой ИГВ (коэффициент “модульной” корреляции), JoA – коэффициент корреляции между Jo и амплитудой (коэффициент полной корреляции), $\langle A \rangle$ – среднее и maxA – максимальное значения амплитуды, stdJo – среднеквадратическое отклонение Jo, n – количество оценок.

той среза 0.01 ц/ч. При вычислении амплитуды ИГВ (A) из рассчитанных с недельным усреднением оценок вычиталось минимальное значение, которое считалось следствием шумовой составляющей сигнала. Данные первых и последних суток наблюдений, искаженные концевыми эффектами фильтрации, не учитывались.

Несмотря на относительную стабильность фоновых течений, временами наблюдались заметные изменения как их скорости, так и направления. Поскольку с такими изменениями должна быть связана генерация ИГВ, возникла необходимость ввести некие показатели изменчивости течений. Простейшим показателем такого рода является разность соседних векторов. Путем присвоения величине векторной разности знака их векторного произведения можно получить достаточно информативный скалярный показатель изменчивости течений – дифференциальный индекс (Dif), хорошо отражающий изменение величины и направления вращения течения.

Поскольку произведение векторов отражает как направление их вращения (отрицательному знаку произведения соответствует вращение “по солнцу”, положительному – “против солнца”), так и изменение величины скорости течения (модуль произведения), то можно ввести и другой, так сказать, векторный индекс (Vec), за который целесообразно принять значение корня квадратного из модуля векторного произведения соседних векторов, взятое со знаком произведения. Векторный индекс хорошо характеризует оба важных для генерации ИГВ фактора – интенсивность изменения векторов фонового течения и знак их вращения, но только в тех случаях, когда изменение направления течения не превышает $+90^\circ$. Среднее из двух величин, определяемых индексами Dif и Vec, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки, назовем объединенным индексом (Jo).

На фоне недельных колебаний амплитуды ИГВ бросается в глаза резкое усиление амплитуды A (выше 3 см/с) в слое 6–10 м между 12-м и 15-м днями измерений (рис. 2б), когда произошел по-

ворот течения по часовой стрелке, чему соответствуют отрицательные значения индекса Jo. Как и при генерации инерционных колебаний вращающимися ветровыми полями [1], и в нашем случае можно было ожидать усиления генерации при вращении фоновых течений “по солнцу”, т.е. в сторону вращения инерционных течений. Анализ рис. 1б, 1в показывает, что и другим всплескам амплитуды A (светлые пятна на рис. 2б) соответствуют понижения индекса Jo (темные пятна на рис. 2в). Налицо противофазность колебаний амплитуды ИГВ и индекса Jo, свидетельствующая в пользу преимущественного значения вращения фоновых течений “по солнцу” при генерации ИГВ. Подобная противофазность колебаний проявляется, правда, несколько слабее, и в более глубоких слоях при меньших скоростях течений и амплитуд.

Проведенное сопоставление значений индексов Dif, Vec, Jo с амплитудой ИГВ показало, что лучше всего амплитуда инерционных волн A коррелируется со значением индекса Jo, что подтверждается данными табл. 1. В таблице приведены результаты оценок величин, характеризующих амплитуду ИГВ и изменчивость фоновых течений по данным измерений на всех станциях в 2003 г.

Анализ данных таблицы показывает, что наблюдается последовательное уменьшение амплитуды ИГВ от станции A3 к станции C4. Индекс Jo уменьшается от станции A3 к B4, хотя на станции C4 он немного подрастает. В общем, как это и следовало ожидать, прошедший 2003 г. тайфун раскчал как низкочастотные, так и возбужденные ими инерционные течения. Значение “модульного” коэффициента корреляции между модулем Jo и амплитудой инерционных волн, рассчитанного по данным на всех горизонтах, было наибольшим (0.63) на станции B3. В то же время полный коэффициент корреляции между индексом Jo (с его знаком) и амплитудой инерционных волн в этой точке оказался низким (-0.30) и отрицательным, что естественно при нелинейной связи и отражает преимущественное значение антициклонического (отрицательного) вращения фоновых течений для генерации ИГВ. На станции A3 при несколько меньшем значении коэффициентов (JA = 0.47 и

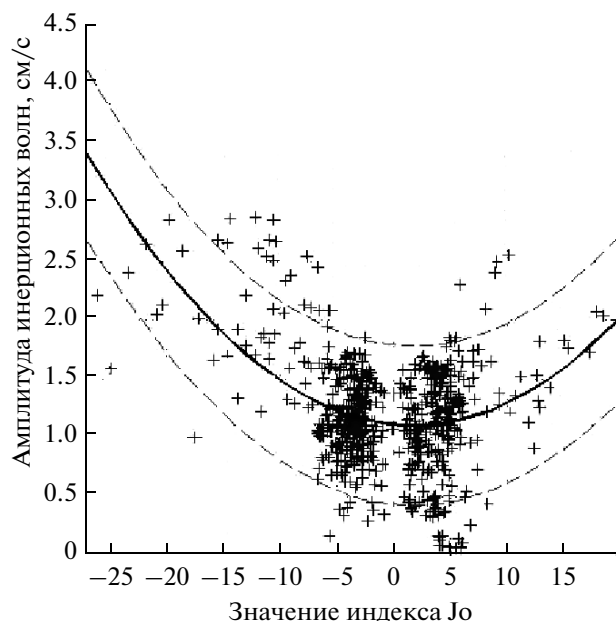


Рис. 3. Связь между индексом изменения фонового течения J_0 и амплитудой ИГВ на станции А3.

$J_0A = -0.26$) полная корреляция тоже была отрицательной. В 2004 г. связь между более слабыми, чем в 2003 г., индексами изменчивости фоновых течений и амплитудами ИГВ практически отсутствовала.

К рассмотрению различий данных 2003 и 2004 гг. мы вернемся позднее. Остановимся подробнее на анализе связи индекса J_0 и амплитуды инерционных волн A . На рис. 3 показано поле оценок J_0 и A на станции А3, а также аппроксимирующая это поле кривая второй степени вместе с 80%-ными доверительными пределами. Линейная аппроксимация здесь подходит плохо, поскольку амплитуда растет как с уменьшением (в левой части графика), так и с увеличением индекса J_0 (в правой части графика). Это означает, что ИГВ, в общем, генерируются изменениями фоновых течений вне зависимости от направления их вращения. Можно, однако, отметить, что левая ветвь аппроксимирующей кривой выше правой, что согласуется с представлением о преимущественной роли отрицательного вращения фоновых течений в генерации ИГВ. Знак коэффициента полной корреляции указывает на преимущество соответствующего направления вращения фонового течения, и, чем симметричнее поле точек (J_0 , A) относительно нуля J_0 , тем хуже корреляция.

Плотное облако точек при малых значениях величин A и J_0 на рис. 3 обусловлено своим происхождением незначительной генерирующей эффективности слабых изменений течений, а также шумовой составляющей сигналов и свойственным профилометру ADP смещением оценок [2, 7]. Для

уменьшения этих эффектов из рассчитанных значений амплитуды вычиталось ее минимальная величина. Заметим, что асимметрия поля точек относительно нулевого значения J_0 для станции В3 была слабее, а для станций В4 и С4 связь практически отсутствовала.

Для оценки связи между объединенным индексом J_0 и амплитудой ИГВ была рассчитана когерентность между этими величинами в верхнем (выше 12 м) и нижнем (глубже 16 м) слоях по осредненным по горизонтам взаимным спектрам, что в пределе обеспечивает до 8-ми и 60-ти степеней свободы оценок когерентности в верхнем (при осреднении по 4 горизонтам) и нижнем (при осреднении по 29–31 горизонтам) слоях соответственно. Хотя, несомненно, существующая связь между колебаниями на разных горизонтах снижает эти предельно возможные величины и, соответственно, снижает состоятельность оценок когерентности. В верхнем слое станции А3 обнаружена четкая связь между выраженными на спектрах 7-суточными колебаниями индекса J_0 и амплитуды внутренних волн A при разности фаз между A и J_0 , равной 160° – 170° , это близко к противофазности колебаний, свойственной преимущественной роли антициклонического вращения фоновых течений в генерации ИГВ. Ощутимая когерентность между A и J_0 наблюдается и в верхнем слое на станции В3, где доминируют 5–6-суточные колебания с разностью фаз 120° – 160° . Такое уже достаточно заметное отличие колебаний от противофазности можно связывать с присутствием здесь ИГВ, возбужденных уже не только локальными источниками.

В 2004 г. амплитуды ИГВ были гораздо меньше и не коррелировались ни с одним из индексов изменчивости фоновых течений. Существенно меньшую долю в значениях индекса J_0 составляли его отрицательные значения), как это следует из сравнения частоты повторяемости индексов разного знака в данных 2003 и 2004 гг. (рис. 4). Гистограммы индексов J_0 по измерениям на станции В в 2003 и 2004 гг., совмещенные на рис. 4, показывают преобладание значительных отрицательных величин J_0 в 2003 г. по сравнению с 2004 г. Таким образом, и снижение в 2004 г. повторяемости случаев антициклонического вращения фоновых течений, по-видимому, тоже сказалось на амплитуде ИГВ 2004 г., помимо общего ослабления течений в этом году.

Разумеется, вполне возможны локальные всплески генерации, которые не проявились в корреляции индекса J_0 и амплитуды A на станциях В4 и С4, но в целом очевидна меньшая интенсивность генерации ИГВ в 2004 г. по сравнению с 2003 г.

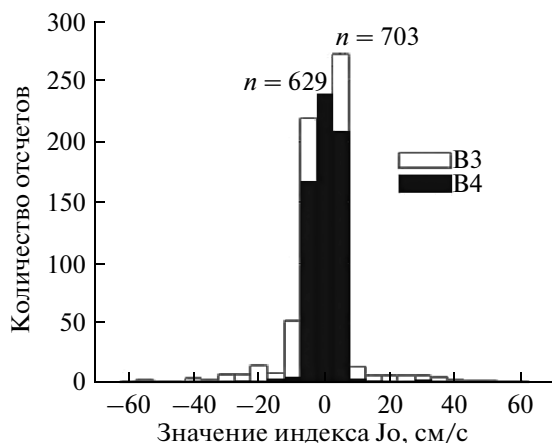


Рис. 4. Гистограммы индекса изменения фонового течения J_0 на станции В в 2003 и 2004 гг.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Установленная интенсификация ИГВ в 2003 г., когда вблизи Гавайских о-вов прошел тайфун, лишний раз подтверждает широко распространенное представление о ветре, как главной причине возбуждения инерционных колебаний океана. Вместе с тем полученные результаты позволяют расширить существующие представления об источниках ИГВ и на более общий случай их генерации при любой перестройке поля течений внутри океана, необязательно связанной с ветровым воздействием.

Наблюдаемые в районе исследований инерционные колебания могли быть связаны как с локальным воздействием ветра и/или течений, так и с ИГВ, пришедшими из удаленных источников. Сопоставление изменчивости низкочастотных

(фоновых для ИГВ) течений с амплитудой ИГВ позволило оценить роль локальной генерации в наблюдаемом поле инерционных колебаний. Сравнив вариации специально разработанного для этой цели индекса изменчивости фоновых течений J_0 с амплитудой ИГВ с помощью параболической аппроксимации полей (J_0 , А), а также корреляции и когерентности между этими величинами, мы получили некоторое представление о соотношении локально и дистанционно возбуждаемых волн в наблюдаемых полях ИГВ и о роли знака вращения фоновых течений в генерации инерционных колебаний. Установлено, что преимущественное значение при генерации инерционных колебаний имеют антициклонические фоновые течения, вращающиеся “по солнцу”, т.е. в том же направлении, что и инерционные течения. Оказалось также, что на станциях наблюдений 2003 г. (А3 и В3), особенно в верхнем слое, доминировали ИГВ местного происхождения, тогда как по наблюдениям в 2004 г. (станции В4 и С4) инерционные волны, скорее всего, приходили из более или менее удаленных источников.

Особо нужно остановиться на инерционных волнах, наблюдавшихся на станции А3, где доминирование локальной генерации было не таким очевидным, как на станции В3. В этой связи заслуживает внимание сопоставление амплитуд ИГВ, а также индексов J_0 на этих станциях. На рис. 5 изображены поля разностей амплитуд ИГВ (а) и индексов изменчивости фоновых течений J_0 (б) на станциях А3 и В3 в градациях уровня серого цвета. В поле разности амплитуд станций А3 и В3 (рис. 5а), видно, что на 13–16-х сутках наблюдений в слое глубже 30 м амплитуда ИГВ на станции А3 была значительно выше, чем на станции В3, хотя заметного увеличения генерирующего фактора – отрицательных величин индекса J_0 – при

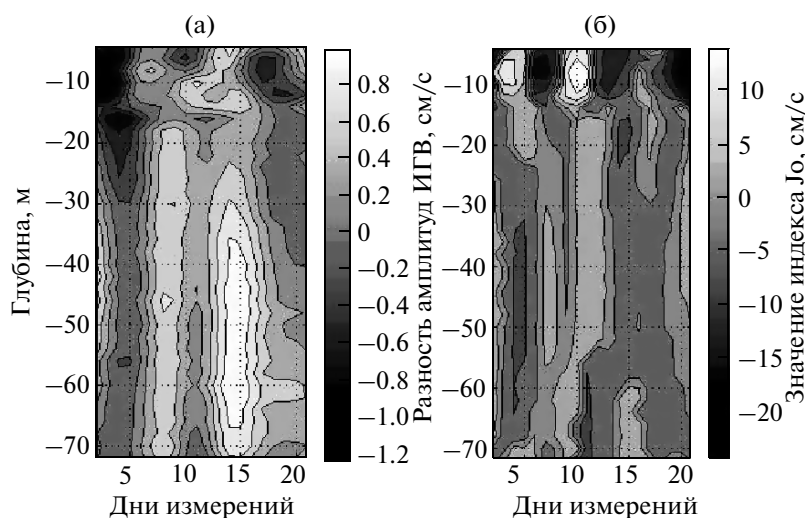


Рис. 5. Разности амплитуд ИГВ на станциях А3 и В3 в 2003 г. (а) и разности значений индекса изменчивости фоновых течений J_0 (б).

Таблица 2.

Обобщения и выводы	Экспериментальные факты
1. Изменения амплитуды ИГВ связаны с изменениями фоновых течений.	Подобие изменений амплитуды и индекса J_0 в верхнем слое океана (рис. 2), а также оценки коэффициентов корреляции (табл. 1) и когерентности.
2. Антициклоническое вращение фоновых течений имеет преимущественное значение в генерации ИГВ по сравнению с циклоническим вращением.	Противофазность колебаний амплитуды и индекса J_0 (рис. 2), оценки коэффициентов корреляции (табл. 1) и когерентности, а также асимметрия параболической связи между J_0 и амплитудой ИГВ (рис. 3).
3. На ближайшей к диффузору сбрасываемых вод станции и в глубинных слоях присутствуют ИГВ нелокального происхождения, что, возможно, связано с приходом ИГВ, возбужденных у диффузора сточных вод.	Ослабление связи амплитуды ИГВ с изменчивостью локальных фоновых течений на станции А3 и в глубинных слоях, проявившееся в оценках коэффициентов корреляции (табл. 1) и когерентности. Особенности изменчивости полей разностей амплитуд, а также индексов J_0 на ближайшей к диффузору и более удаленной от него станциях (рис. 4).
4. Ослабление ИГВ в 2004 г. по сравнению с 2003 г., по-видимому, связанное с общим ослаблением течений в 2004 г., сопровождавшимся снижением роли благоприятных для генерации ИГВ антициклонических фоновых течений.	Отсутствие связи между амплитудой ИГВ и индексом J_0 на станциях В4 и С4 (табл. 1). Различие гистограмм индекса изменения фонового течения J_0 2003 и 2004 гг. (рис. 5).

этом не отмечалось (рис. 5б). Причину этого, скорее всего, следует искать в близости станции А3 к расположению глубоководного выпуска сточных вод, где сильные струи сбрасываемых вод, вытекающие из диффузора с большой скоростью (3 м/с), по-видимому, сопровождаются инерционными колебаниями и излучением волн, которые и проявляются в поле ИГВ станции А3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подытожим полученные результаты в виде табл. 2, в правой части которой приведены экспериментальные факты, полученные в результате анализа данных наблюдений, а в левой — обобщения и выводы, сделанные на основании анализа экспериментальных фактов.

Пока еще не ясно, какие процессы в водной толще, возможно, порожденные прошедшим в 2003 г. тайфуном, приводят к сильной изменчивости фоновых течений, хорошо заметных в виде недельных колебаний векторов течений и индекса J_0 на рис. 1. Возможно, что это — краевые волны и/или вихри небольших размеров, подобные субмезомасштабным вихрям на шельфе Черного моря [9]. Эти вопросы авторы надеются прояснить в следующей статье, посвященной распространению ИГВ в заливе Мамала, где проводились наблюдения.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках грантов РФФИ №№ 14-05-91759, 13-05-12019 и в рамках гранта “Ведущие научные школы” (НШ-2351.2014.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коняев К.В., Сабинин К.Д.* Волны внутри океана. СПб.: ГИМИЗ, 1992. 272 с.
2. *Бондур В.Г., Сабинин К.Д., Гребенюк Ю.В.* Аномальная изменчивость инерционных колебаний океанских вод на Гавайском шельфе // ДАН. 2013. Т. 450. № 1. С. 100–104.
3. *Bondur V.G.* Satellite monitoring and mathematical modelling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // Waste Water – Evaluation and Management, ISBN 978-953-307-233-3, InTech, Croatia, 2011, P. 155–180. <http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>.
4. *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. Saint Petersburg: ISRSE, 2006. P. 192–195.
5. *Bondur V.* Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. Saint Petersburg: ISRSE, 2006. 7 p.
6. *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.
7. *Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д.* Изменчивость внутренних приливов в прибрежной акватории о. Оаху (Гавайи) // Океанология. 2008. Т. 48. № 5. С. 661–671.
8. *Morozov E.G., Velarde M.G.* Inertial Oscillations as Deep Ocean Response to Hurricanes // J. Oceanog. 2008. V. 64. P. 495–509.
9. *Зацепин А.Г., Кондрашов А.А., Корж А.О. и др.* Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 592–605.

Generation of Inertia-Gravity Waves on an Island Shelf

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

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

^b Andreev Acoustic Institute, ul. Shvernika 4, Moscow, 117036 Russia

e-mail: vgbondur@aerocosmos.info, ksabinin@yandex.ru, grebenyk@gmail.com

Received April 29, 2014; in final form, August 12, 2014

Abstract—The data on currents near Oahu Island (Hawaii) measured in 2003 and 2004 using bottom acoustic current profilers placed at the edge of the shelf in Mamala Bay are analyzed. The variations in the amplitude of inertia-gravity waves (IGWs) are compared with those in background low-frequency currents using specially designed indicators of variations in the magnitude and direction of the currents. It is established that a good connection between the wave amplitude and variability of background currents is observed in cases of local IGW generation, especially if the currents rotate clockwise. This connection becomes weaker in the presence of waves coming from far sources, the role of which can be played, in particular, by IGWs excited by drain water jets flowing from a deep-water diffuser. The obtained results show that IGWs can be associated not only with the action of wind, but also directly with any restructuring of the current field inside the ocean.

Keywords: inertia–gravity waves, current profiler, shelf.