

УДК 551.465; 551.466

## ТОНКИЕ ВИХРЕВЫЕ СТОЛБЫ НА ШЕЛЬФЕ В ОБЛАСТИ ВЛИЯНИЯ ПРИДОННОЙ КОНВЕКЦИИ

© 2011 г. В. Г. Бондур\*, Ю. В. Гребенюк\*, С. И. Муякшин\*\*, К. Д. Сабинин\*\*\*

\* *ГУ Научный центр аэрокосмического мониторинга “Аэрокосмос”  
105064 Москва, Гороховский пер., 4*

*E-mail: vgbondur@aerocosmos.info, grebenyk@gmail.com*

\*\* *ГОУ Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского  
603950 Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23*

*E-mail: serg\_mun@list.ru*

\*\*\* *Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева  
117036 Москва, ул. Шверника, 4*

*E-mail: ksabinin@yandex.ru*

Поступила в редакцию 12.04.2010 г.

В статье анализируются результаты исследований экстремально больших выбросов скоростей течений, которые были зарегистрированы акустическим доплеровским профилометром в процессе экспериментов, проведенных на Гавайском шельфе. При комплексном анализе изменчивости полей течений использовались данные профилей скоростей течений, температуры и интенсивности звукорассеивающих слоев. На основе проведенных исследований выдвинута гипотеза, суть которой заключается в том, что мелкомасштабная изменчивость течений в данных профилометра обусловлена прохождением узких вихрей, возникающих при истечении и подъеме распресненных вод из заглубленного стока вблизи края шельфа. С целью подтверждения предложенной гипотезы о механизме возникновения наблюдаемых выбросов скоростей течений проведено математическое моделирование отклика доплеровского измерителя на прохождение узкого вихря, которое показало хорошее соответствие модельных расчетов с экспериментальными данными. Подобные явления выявлены также и в Геленджикской бухте Черного моря.

**Ключевые слова:** доплеровский профилометр, профиль скорости, солитон, внутренняя волна, изотерма, вихревой столб, придонная конвекция.

### ВВЕДЕНИЕ

По данным измерений характеристик полей течений на Гавайском шельфе (б. Мамала), выполненных с помощью акустического доплеровского профилометра, выявлены экстремально большие выбросы скоростей течений. Для комплексного анализа изменчивости полей течений использовались профили скоростей, температуры и интенсивности звукорассеивающих слоев. По результатам исследований выдвинута гипотеза о том, что специфические проявления мелкомасштабной изменчивости течений, выявленные по данным профилометра, связаны с узкими вихрями, возникающими при истечении и подъеме распресненных вод из заглубленного стока вблизи края шельфа [1]. Для подтверждения предложенной гипотезы о механизме возникновения наблюдаемых выбросов скоростей течений проведено математическое моделирование отклика доплеровского измерителя на прохождение тонкого вихря, которое показало хорошее соот-

ветствие модельных расчетов с экспериментальными данными.

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ И ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В акватории б. Мамала у о. Оаху (Гавайские о-ва) в течение ряда лет проводились комплексные исследования антропогенных воздействий на экосистемы прибрежных акваторий, вызванных заглубленным стоком, в ходе которых измерялись характеристики течений и температуры с помощью заякоренных термогирлянд и донных акустических профилометров течений (ADP) и [2–7]. Расположение станций, на которых проводились измерения вертикальных профилей температуры (станции Ат, Вт, Ст) и трех составляющих вектора скорости течений (станции Ав, Вв, Св), показано на рис. 1. Скорости течений измерялись на глубинах от 4 до 76 м с дискретностью по глубине 2 м и по времени — 1 мин.

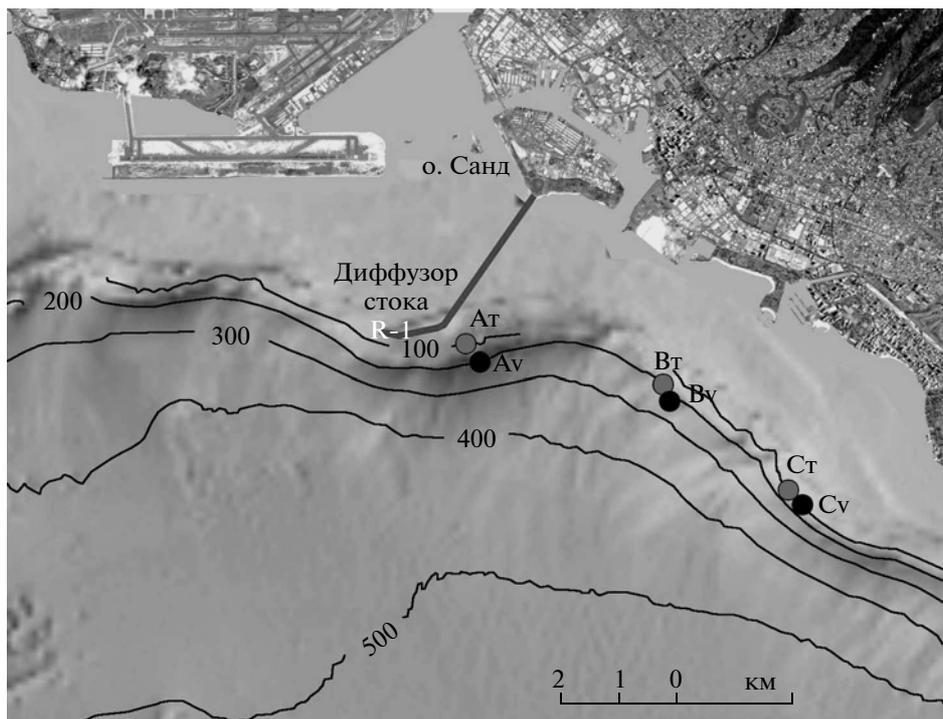


Рис. 1. Схема расположения станций измерения температуры и скоростей течений в акватории б. Мамала (Гавайи).

Измерения температуры воды проводились на разных горизонтах от 3–18 до 45–76 м с дискретностью от 30 с до 2–5 мин.

Анализ данных гидрофизических измерений показал, что на Гавайском шельфе в б. Мамала, как и на других шельфах, наблюдаются короткопериодные внутренние волны, обусловленные вариациями полей течений и глубин залеганий термоклина [2, 3, 6, 8, 9]. Временные масштабы этих колебаний обычно измеряются немногими десятками минут, хотя в особенно интенсивных солитонах сильные изменения параметров среды происходят за несколько минут [8, 9]. В то же время на шельфе б. Мамала встречаются и еще более резкие изменения, отражающиеся в записях донных ADP, когда фиксируются сильные импульсные всплески горизонтальных течений с резкой сменой их направления вплоть до противоположного всего за одну минуту. При этом одновременно с горизонтальными, как правило, резко менялись и вертикальные составляющие скоростей течений [1, 10].

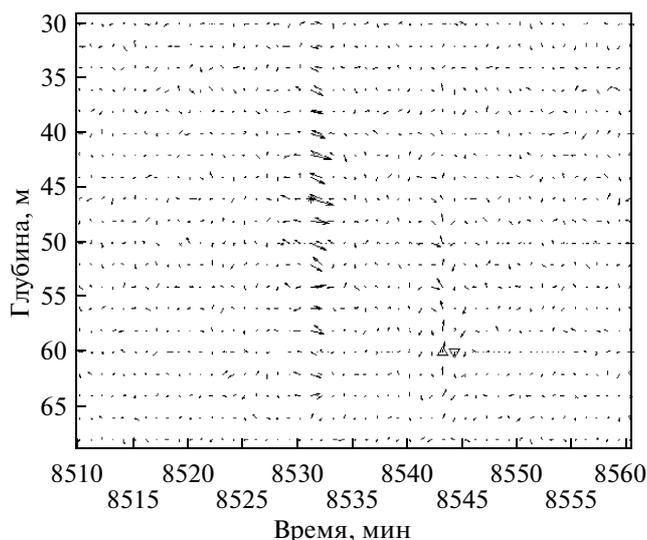
### КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТЕЙ ТЕЧЕНИЙ, КОЭФФИЦИЕНТОВ РАССЕЯНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Анализ характеристик течений, измеренных с помощью ADP в б. Мамала, выявил наличие больших выбросов в их скоростях, вероятность появле-

ния которых существенно превышает значения для гауссового процесса [1, 10]. Экстремальные выбросы скоростей течений наблюдались на всех станциях в период измерений в 2002–2004 гг. как в исходных течениях, так и в их высокочастотных составляющих (выше 10 ц/час).

Анализ данных измерений показал, что амплитуда выбросов горизонтальных скоростей течений достигает  $\pm 30$  см/с при среднеквадратической ошибке измерений (СКО)  $\sim 4$  см/с, а их длительность не превышает 2 мин [1, 10]. Наблюдаются как однополярные выбросы (положительные или отрицательные импульсы), так и биполярные, когда смена полярности импульса происходит через интервал дискретизации, равный 1 мин. Биполярные импульсные всплески скоростей течений наблюдаются значительно реже, чем однополярные, хотя они вызывают наибольший интерес.

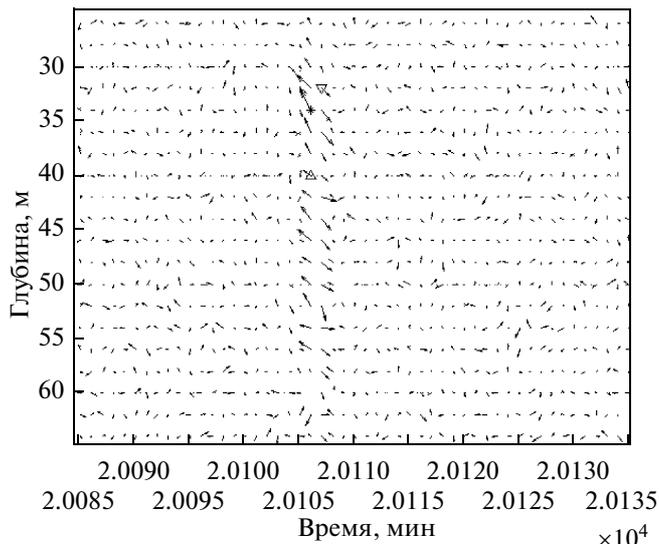
Наблюдавшиеся всплески скоростей течений можно было бы связывать с влиянием собственных движений активных рассеивателей, что не исключено при измерениях акустическим профилометром, или принять за ошибки измерений, если бы не некоторые особенности, позволяющие усомниться в таком слишком простом объяснении. Прежде всего, при анализе импульсов обращалось внимание на то, чтобы в поле, облучаемом ADP, не было косяков рыб, которые за счет собственных движений могли бы приводить к всплескам скорости, рассчитывае-



**Рис. 2.** Пример наблюдения биполярных импульсных всплесков высокочастотных составляющих скоростей течений на станции Av в 2003 г., положение максимума горизонтальной скорости (36 см/с) отмечено звездочкой, а экстремумов вертикальной скорости (6 и  $-4$  см/с) — треугольниками с вершинами вверх и вниз соответственно; скорость среднего течения 18 см/с, азимут  $253^\circ$ . По оси ординат указано время наблюдения в мин на данной станции.

мой по данным ADP. Скопления активных рассеивателей обычно хорошо проявляются в интенсивности рассеяния сигналов акустических профилометров [11, 12]. Представляется маловероятным также возникновение ошибочных всплесков одновременно на многих горизонтах, как это видно, например, на рис. 2–4.

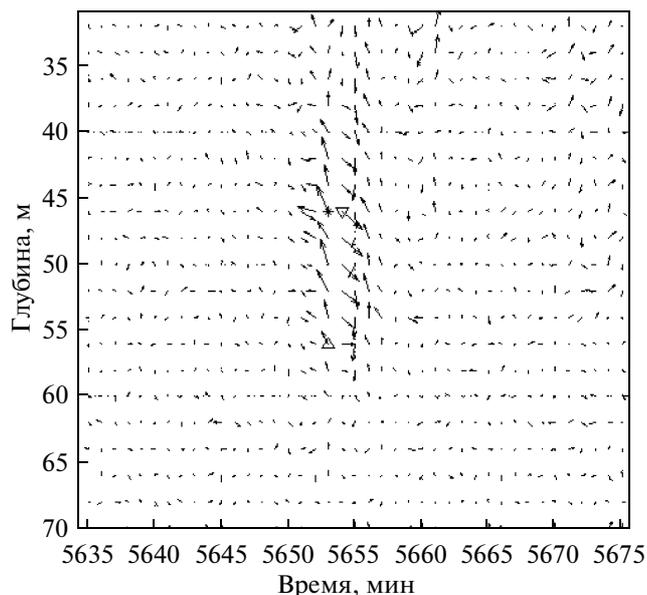
Для уменьшения ошибок применялось сглаживание данных измерений по глубине низкочастотным фильтром Баттеруорда 3-го порядка с частотой среза 100 ц/км (сглаживание по 10 м). Сильные выбросы наблюдаются как в исходных значениях течений  $U$ ,  $V$ ,  $W$ , так и в их высокочастотных составляющих. О частоте наблюдения импульсных всплесков скоростей течений в исследуемой акватории можно судить по результатам анализа полей течений в течение 19 дней на станции Bv в 2004 г. (27370 отсчетов с дискретностью 1 мин на каждом горизонте). Всего на этой станции на глубинах 12–70 м было зафиксировано 920 импульсов, удовлетворяющих условию превышения их амплитуды над среднеквадратической ошибкой измерений не менее, чем в 3.5 раза. В процентном отношении количество таких выбросов на одном горизонте составляет 0.11%, что значительно превышает показатели для гауссова процесса (0.046%). Наиболее резкие неоднородности имели вид биполярных импульсов. Примеры таких импульсов приведены на рис. 2–4.



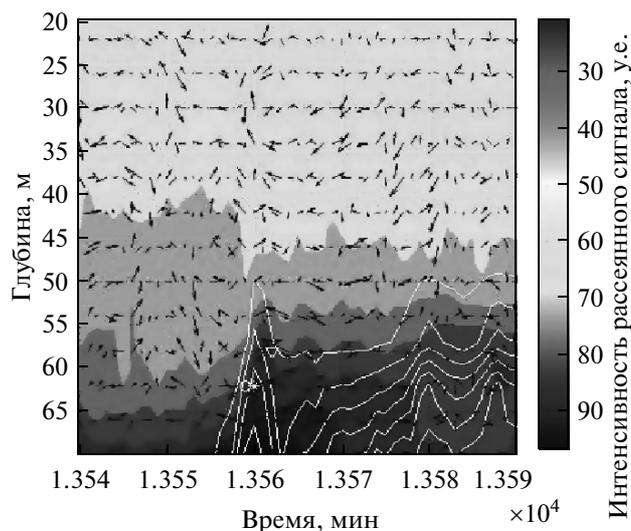
**Рис. 3.** Пример наблюдения биполярных импульсных всплесков высокочастотных составляющих скоростей течений на станции Bv в 2004 г., положение максимума скорости на 20106-й мин, равного 42 см/с, отмечено звездочкой, а положение максимума (+6 см/с) и минимума ( $-5$  см/с) — треугольниками с вершинами вверх и вниз соответственно; скорость среднего течения 14 см/с, азимут  $120^\circ$ . По оси ординат указано время наблюдения в мин на данной станции.

При выяснении причин возникновения сильных выбросов скоростей течений проверялось, прежде всего, не вызваны ли они прохождением солитонов внутренних волн, которые сопровождаются смещением глубин изотерм. Выбросы течений, обусловленные солитонами, могут быть определены по результатам совместного анализа скоростей течений, температуры и звукорассеивающих слоев [11–13]. Для этого был проведен комплексный анализ этих характеристик для двух типов резкой изменчивости водной среды — в солитонах и в биполярных импульсных всплесках течений. При комплексном анализе полей течений использовались ежеминутные профили их скоростей, а также температуры и интенсивности сигнала, рассеянного звукорассеивающими слоями (ЗРС). Ежеминутные профили течений измерялись с помощью донных ADP, установленных вблизи кромки шельфа, а колебания температуры — на термогириляндах, закоренных вблизи ADP (рис. 1)

В солитоне, зарегистрированном в точке Bv в 2004 г. (см. рис. 5), вблизи 13560-й минуты измерений (начало измерений — 10 ч 59 мин 20 августа 2004 г.) термоклин взмыл вверх на 18 м всего за 3 минуты, что отразилось и в поле звукорассеивающих слоев, а скорость течения увеличилась вдвое (до 15 см/с) с резким поворотом к северо-восточному направлению. Экстремумы вертикальных скоростей, достигавших  $+4$  и  $-5$  см/с, наблюдались по



**Рис. 4.** Пример наблюдения биполярных импульсных всплесков высокочастотных составляющих скоростей течений на станции С<sub>у</sub> в 2004 г., положение максимума скорости (40 см/с) на 5654-й мин, отмечено звездочкой, а положение максимума (+5 см/с) и минимума (−4 см/с) вертикальной скорости треугольниками с вершинами вверх и вниз соответственно; средняя скорость течения 15 см/с, азимут 310°. По оси ординат указано время наблюдения в мин на данной станции.



**Рис. 5.** Проявление типичного солитона в б. Мамала в поле течений, температуры и ЗРС. Изображены векторы скорости течений (стрелки, север вверх). Положение максимума скорости, равного 15 см/с, отмечено звездочкой, а экстремумов вертикальной скорости, равных +4 и −5 см/с, кружком и треугольником соответственно. Интенсивность рассеянного акустического сигнала показана теневой картиной. Изотермы (линии белого цвета) построены по данным термогирлянды, заякоренной вблизи от АДР.

обе стороны от максимума горизонтальной скорости, как это и должно быть в солитонах [13].

Наиболее резкие выбросы скоростей течений, зарегистрированных с помощью АДР, имели вид биполярных импульсов, когда усиление течений сопровождалось их поворотом на противоположное направление почти во всем слое измерений. Примеры типичных биполярных импульсных всплесков скоростей течений, зарегистрированных на всех точках наблюдений А<sub>у</sub>, В<sub>у</sub> и С<sub>у</sub>, приведены на рис. 2–4. Остановимся подробнее на импульсной биполярной всплеске течений, зарегистрированной в точке В<sub>у</sub> в 2004 г. на 20106–20107-й мин измерений (см. рис. 3). Здесь, как и в других случаях подобных всплесков, наблюдававшихся на всех АДР, слабые хаотические высокочастотные течения внезапно сменялись течениями, резко усилившимися и одинаково направленными почти во всей водной толще. Причем направление течений скачкообразно менялось на противоположное уже на следующей минуте. В данных измерений, проведенных в 2004 г., было зарегистрировано 25 подобных импульсных всплесков. Характерно, что в отличие от солитонов моменты всплесков горизонтальных скоростей совпадают с моментами экстремумов вертикальной скорости течения (см. рис. 3).

На небольшом расстоянии от точки измерений профилей течений (в 61 м к востоку-юго-востоку, азимут 111°) была расположена термогирлянда, где проводились измерения температуры на восьми горизонтах в диапазоне 19–72 м (см. рис. 1). На рис. 6 приведен график колебаний изотерм для исследуемого интервала времени. Из анализа графика видно, что на 20112-й мин произошло слабое поднятие изотерм на 1–3 м, которое можно связать с прохождением над термогирляндой неоднородности, вызвавшей резкую всплеску скорости течения на АДР, произошедшую шесть минутами раньше. Под действием существовавшего в этом районе среднего течения (скорость 0.14 м/с, азимут 120°) неоднородность, переносимая этим течением, должна была пройти над термогирляндой через 7 мин после прохождения АДР. Это практически совпадает с измененным временным сдвигом в 6 мин между появлением неоднородности в рассматриваемых точках и соответствует скорости переноса около 0.2 м/с. По подъему изотерм на 1 м за одну минуту между горизонтами 59 и 63 м, где расстояние между термисторами было наименьшим (а значит, и оценка вертикального смещения может быть сделана наиболее точно), было установлено, что вертикальная скорость течения составляет ~1 см/с, что существенно меньше измеренной АДР (+9 и −5 см/с).

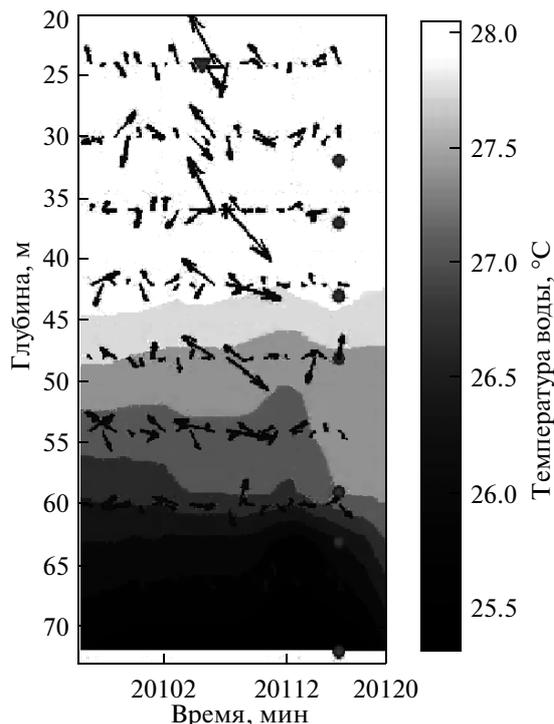


Рис. 6. Колебания изотерм (тени) и вектора высокочастотных течений (стрелки) в окрестности импульсной вспышки течений, изображенной на рис. 4. Сборку кружками показано расположение датчиков температуры по глубине.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ДОПЛЕРОВСКОГО ПРОФИЛОГРАФА НА ПРОХОЖДЕНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР

Для объяснения наблюдаемых выбросов была предложена гипотеза о том, что специфические проявления мелкомасштабной изменчивости течений в данных ADP, полученных на шельфе в области влияния заглубленного стока, скорее всего, связаны с тонкими вихрями (вихревыми столбами), возникающими при истечении и подъеме распресненных сточных вод из диффузора [1, 10]. Для ее обоснования необходимо выяснить, как отобразится в показаниях ADP прохождение через его лучи такого тонкого вихря.

Акустический доплеровский профилометр течений (Acoustic Doppler Current Profiler – ADCP; в этой статье используется аббревиатура ADP) представляет собой 3-х или 4-х лучевой импульсный гидролокатор [14]. Его лучи расположены симметрично относительно вертикальной оси и отклонены от нее на одинаковые углы. Принятый по каждому лучу эхосигнал анализируется в примыкающих друг к другу временных окнах с целью выделения доплеровского сдвига частоты  $\Delta f$ , который пропорционален проекции скорости рассеивателей относительно антенны на ось луча  $V_i$ :

$$\Delta f = 2f_0 V_i / C_s,$$

где  $f_0$  – несущая частота,  $C_s$  – скорость звука.

Зная запаздывание определенного окна  $t_w$ , можно локализовать положение соответствующего элемента дальности (ЭД) относительно антенны:  $r = C_s t_w / 2$ .

В основу алгоритма обработки данных акустического доплеровского профилометра течений положено предположение о постоянстве скорости течения во всех элементах дальности, находящихся на определенной глубине. С помощью ADP скорости измеряются правильно только в том случае, когда масштаб неоднородностей течения существенно больше расстояния между лучами ADP [14]. Минутные скачки скорости в показаниях ADP не могут быть связаны с достаточно большими пространственными масштабами и поэтому сигнализируют лишь о неоднородности поля течений между лучами ADP. Поэтому, строго говоря, с помощью ADP нельзя получить правильную картину течений в такой тонкой неоднородности, как вихревой столб (вихрь, высота которого существенно больше его диаметра).

С целью подтверждения гипотезы о том, что импульсные вспышки течений обусловлены прохождением тонких вихрей через лучи доплеровского профилометра, было проведено математическое моделирование его отклика на проходящий мимо вертикальный вихрь с пространственным масштабом, существенно меньшим расстояния между его лучами (и элементами дальности). Под откликом ADP будем понимать временные реализации трех величин, которые в случае однородного поля скорости течения являлись бы ее проекциями  $V_x, V_y, V_z$  на оси прямоугольной системы координат, связанной с прибором. Естественно направить вертикальную ось  $Z$  этой “приборной” системы координат вдоль оси симметрии антенной системы прибора. Тогда для 3-х лучевой версии прибора, которая применялась в нашем случае, эти проекции можно вычислить с помощью следующего матричного преобразования:

$$\begin{pmatrix} \frac{-2}{3 \sin \Theta} & \frac{1}{3 \sin \Theta} & \frac{1}{3 \sin \Theta} \\ 0 & \frac{-1}{\sqrt{3} \sin \Theta} & \frac{1}{\sqrt{3} \sin \Theta} \\ \frac{1}{3 \cos \Theta} & \frac{1}{3 \cos \Theta} & \frac{1}{3 \cos \Theta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Здесь  $V_i, i = 1, 2, 3$  – проекции скорости течения на оси лучей ADP;  $\Theta$  – угол отклонения осей лучей от вертикали,  $\Theta = 25^\circ$ .

Чтобы смоделировать зависимости выходных величин прибора от времени, нужно рассчитать, как изменяются эти проекции при разных положениях вихря относительно ADP. В качестве модели возьмем т.н. “вихрь Рэнкина”, который представля-

ет собой цилиндрический вихрь с вертикальной осью и с твердотельным вращением во внутренней области радиусом  $R_0$ , где скорость нарастает с удалением от центра линейно до максимального значения  $V_{\max}$ , после чего она спадает обратно пропорционально расстоянию по закону  $V = V(R_0)R_0/R$ . Таким образом, мы не принимаем во внимание вертикальные скорости (см. выше), течение во внутренней области считаем вихревым, а во внешней – потенциальным. Зададимся значениями  $R_0 = 5$  м и  $V_{\max} = 0.5$  м/с, соответствующими оценкам параметров вихрей, приведенной в [1].

Строго говоря, при моделировании прохождения вихря должна быть учтена скорость однородного течения, которое его переносит. Однако, как было сказано выше, экспериментальные реализации скорости перед анализом подвергались высокочастотной фильтрации. Поэтому скорость переноса не учитывалась, и фактически рассчитывались только отклонения от нее. Для моделирования отклика ADP на прохождение вихря была разработана схема расчета проекций скорости жидкости на лучи прибора  $V_i$  в зависимости от расстояния вихря до центра прибора и элементов дальности.

Поскольку поле течения обладает цилиндрической симметрией относительно оси вихря, то для моделирования отклика ADP на прохождение вихря оказалось удобным рассматривать перемещение прибора относительно вихря, а не вихря относительно прибора. Положение центра прибора – точки, из которой исходят проекции его лучей на горизонтальную плоскость, – зададим относительно оси вихря координатами  $X, Y$ . Длину проекций луча обозначим как  $D$ . Эта величина зависит от высоты над дном  $Z_0$  того слоя, где производится измерение скорости:

$$D = \operatorname{tg}(\Theta)Z_0.$$

Под  $r_0$  будем понимать расстояние от центра вихря до центра прибора, под  $r_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) – расстояния от центра вихря до соответствующих элементов дальности. Тогда для проекций скорости течения на лучи можно получить следующие выражения:

$$V_i = V(r_i) \sin\left(\arccos\left(\frac{D^2 + (r_i^2 - r_0^2)}{2Dr_i}\right)\right) \sin(\Theta). \quad (2)$$

В этой формуле:  $i = 1, 2, 3$  и

$$r_0 = \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad (3)$$

$$r_1 = \sqrt{X^2 + (D + Y)^2}, \quad (4)$$

$$r_2 = \sqrt{(X - D \sin(\pi/3))^2 + (Y - D \cos(\pi/3))^2}, \quad (5)$$

$$r_3 = \sqrt{(X + D \sin(\pi/3))^2 + (Y - D \cos(\pi/3))^2}, \quad (6)$$

$$V(r) = \begin{cases} V_{\max} \frac{r}{R_0} & \text{при } r \leq R_0, \\ V_{\max} \frac{R_0}{r} & \text{при } r \geq R_0. \end{cases} \quad (7)$$

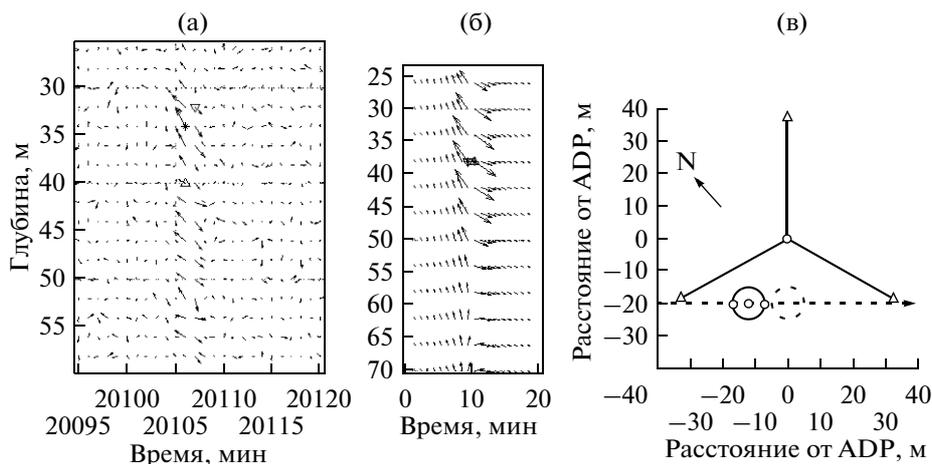
Для расчетов с помощью формул (1)–(7) была разработана программа на языке MATLAB. Для проверки достоверности моделирования был вычислен отклик прибора на “большой” вихрь, проходящий точно через его центр вдоль оси  $OX$ . Иными словами, предполагалось, что  $D \ll R_0$ . Очевидно, что при этом почти во всем поле течения в вихре выполняется условие локальной однородности поля скорости. Нарушение этого условия возникает только на границе  $R = R_0$ . При этом появляется ложный выброс вертикальной составляющей скорости, которая вдали от границы с высокой точностью равна нулю. Аналогичные выбросы наблюдаются и в экспериментальных данных. Составляющая  $V_y$  ведет себя в соответствии с модельным полем, а  $V_x$  также демонстрирует ложные выбросы на границе “твердотельной” части вихря.

С помощью этой программы было проведено моделирование отклика прибора на проходящий над ним вихрь.

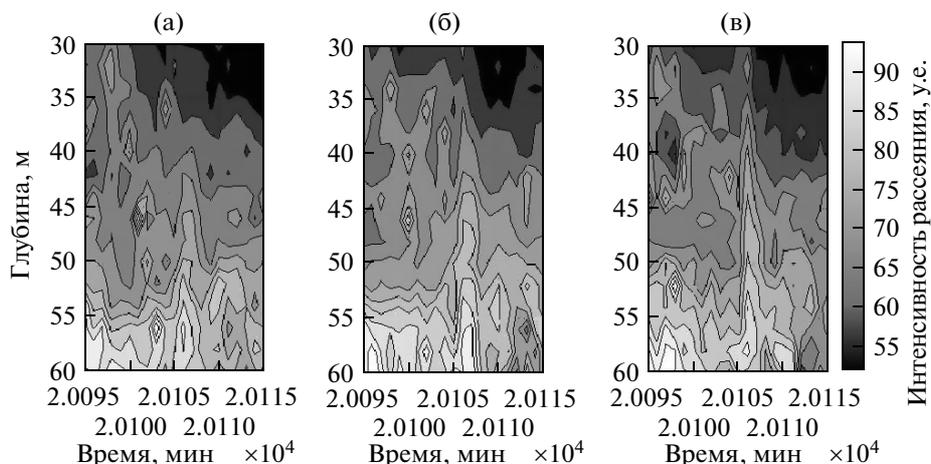
Отклик ADP на прохождение вихря зависит от многих параметров, прежде всего, от направления вращения вихря, скорости и направления его перемещения, положения траектории вихря относительно ADP, ориентации лучей вихря, от дискретности измерений и даже от того, в какие моменты прохождения вихря над ADP проводились измерения (при недостаточно частых измерениях узкий вихрь не может отразиться в измерениях достаточно детально).

Были выполнены расчеты скоростей течений для широкого диапазона значений параметров вихря, которые показали следующее. Прохождение узких вихрей через лучи ADP приводит к появлению резких выбросов в скоростях течений, измеряемых прибором. Амплитуда выбросов и их вид (однополярные, биполярные) зависят от расположения вихря относительно ADP и направления его перемещения.

На рис. 7а, 7б приведено сравнение модельных расчетов (рис. 7б) с данными натурных измерений скоростей течений (рис. 7а), выполненных в точке Вv в 2004 г. на 20095–20115 мин. Среди многих рассмотренных вариантов картины, наблюдавшейся в этой точке, наиболее соответствует случай, когда антициклональный вихрь с указанными выше параметрами движется на восток-юго-восток, причем центр его проходит на 20 м к юго-юго-западу от центра ADP, как это схематически показано на рис. 7в. Необходимо заметить, что при других вариантах прохождения модельного вихря относительно



**Рис. 7.** а – Импульсная вспышка высокочастотных (выше 10 ц/ч) течений, зарегистрированная на 20106-й минуте измерений в точке Вv в 2004 г. Изображены векторы течений (стрелки, север вверх). Положение максимума скорости, равного 42 см/с, отмечено звездочкой, а экстремумов вертикальной скорости, равных 6 и –5 см/с, – треугольниками с вершинами вверх и вниз соответственно. б – Векторы течений по модели отклика ADP на антициклональный вихрь Рэнкина с параметрами  $R = 5$  м и  $V_{\max} = 0.5$  м/с, проходящего мимо ADP на юго-восток со скоростью 0.2 м/с (центр вихря проходит в 20 м к юго-западу от ADP). Максимум горизонтальной скорости достигает 29 см/с, экстремумы вертикальной скорости равны  $\pm 6$  см/с. в – Схема движения вихря; тремя отрезками прямых, исходящими из общей точки, показаны проекции лучей ADP на морскую поверхность; граница центральной части вихря, на которой орбитальная скорость достигает максимума, показана окружностями для 9-й (сплошная линия) и 10-й (пунктир) минут расчета, что соответствует 20106-й и 20107-й мин измерений; стрелкой указано направление на север, пунктирной линией – траектория вихря.



**Рис. 8.** Интенсивность рассеянного сигнала на разных лучах станции Вv в 2004 г. в период 20095–20110 мин наблюдения: а – луч 1 (северо-восточный); б – луч 2 (юго-восточный); в – луч 3 (юго-западный).

прибора отклик ADP мог существенно изменяться, приобретая вид и одиночной вспышки, и менее значительного поворота вектора в двойном импульсе. В большинстве случаев такой поворот происходит за 1–2 мин.

Анализ рис. 7а, 7б показывает хорошее соответствие модельных расчетов и данных натуральных измерений. Особенно примечательно близкое соответствие экстремумов вертикальных скоростей не только по глубине (33–40 м на рис. 7а и 38 м на

рис. 7б), но и по величинам (+6, –5 см/с на рис. 7а и  $\pm 6$  см/с на рис. 7б).

Поскольку в принятой модели вихря вертикальных движений вообще нет, присутствие вертикальных скоростей в отклике ADP (см. рис. 7б) – это артефакт, связанный с особенностями отклика этого прибора. Совпадение моментов вспышек вертикальных и горизонтальных скоростей в данных измерений и в результатах расчета объясняется тем, что зафиксированные вертикальные скорости в данном случае не соответствуют истинным движе-

ниям, а появляются из-за проекции горизонтальных течений в вихре на наклонные лучи ADP.

Совпадение всплесков вертикальных и горизонтальных скоростей во времени, свойственное почти всем зарегистрированным импульсам, является, как уже отмечалось выше, характерным признаком, отличающим их от внутренних волн, в которых горизонтальные и вертикальные скорости находятся в квадратуре.

Рассмотрим более подробно вопрос о связи выявленных всплесков скоростей течений с интенсивностью обратного звукорассеяния, но уже не в плане маловероятного влияния активных движений рассеивателей на показания ADP, а с точки зрения захвата вихрями примесей, как это наблюдалось, например, в [15].

На рис. 8а–8в показана интенсивность рассеяния по данным измерений на станции Bv в 2004 отдельно для трех лучей. Анализ рис. 8а–8в показывает, что концентрация примеси на первом луче была значительно слабее, чем на втором и третьем. Это согласуется с предполагаемым движением вихря, основная часть которого проходит сначала через третий, а затем — через второй луч (см. рис. 7в). Всплеск рассеяния был лучше всего выражен на третьем луче, где он совпал с северо-западным максимумом скорости (передний край вихря?). На втором луче он был менее компактным, а на первом луче проявлялся слабо.

В общем, вся совокупность рассмотренных фактов хорошо объясняется в рамках вихревой гипотезы, сформулированной в [1] и подтвержденной результатами моделирования отклика ADP на прохождение тонких вихрей.

Мы не можем исключать возможности и других интерпретаций полученных данных, но, на наш взгляд, в океане вряд ли существуют мелкомасштабные неоднородности течений, амплитуда которых была бы столь же велика, как в описанных импульсных всплесках. Даже такое резкое явление, как солитоны, имеет гораздо большие пространственные масштабы и иные соотношения между горизонтальными и вертикальными течениями.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного комплексного анализа исследованы характеристики экстремально больших выбросов скоростей течений, зарегистрированных доплеровским измерителем в б. Мамала, и возможные причины их возникновения. Предложена гипотеза, суть которой заключается в том, что специфические проявления мелкомасштабной изменчивости течений связаны с тонкими вихрями, которые могут возникать на шельфе под воздействием придонной конвекции. Проведенное моделирование отклика доплеровского измерителя те-

чений на прохождения тонких вихревых образований подтвердило справедливость этой гипотезы.

В заключение заметим, что появление вихревых образований в б. Мамала вполне вероятно, если не неизбежно, поскольку из-за заглубленного сброса пресных вод г. Гонолулу в воде над шельфом возникает мощная конвекция, в поле которой могут появляться небольшие вихри, подобные пылевым вихорькам в приземном воздухе, наблюдаемым в жаркий день над нагретыми участками суши.

Некоторое подобие такому вихреобразованию можно усмотреть и в результатах лабораторных экспериментов по конвекции во вращающемся объеме воды, когда тонущая в воде капля более тяжелой жидкости образует вихрь, концентрирующий внутри себя всю примесь [15]. Такой концентрацией примеси в вихрях может объясняться и повышение интенсивности рассеяния внутри многих из наблюдавшихся нами импульсных всплесков.

Важно отметить, что если гипотеза о вихрях в конвективном слое подтвердится в ходе планируемых авторами дальнейших натуральных и лабораторных экспериментов, то возникнет необходимость внести коррективы в представление о чисто диффузионном распространении примесей в зоне влияния глубинных стоков, учтя захват и перенос примеси более или менее долгоживущими вихрями. Заметим также, что подобные явления могут возникать и в районах придонной разгрузки пресных грунтовых вод, поступающих на шельф из водоносных слоев с берега, как это происходит, например, у берегов Крыма и Кавказа, а также в районах выхода газовых факелов [16].

Проведенные в 2009 г. в акватории Геленджикской бухты измерения скоростей течений с помощью донного ADCP вблизи глубоководного сброса пресных вод также показали наличие сильных выбросов скоростей течений, подобных рассмотренным выше. Результаты исследований высокочастотных составляющих скоростей течений в Геленджикской бухте предполагается опубликовать в новой статье.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д.* Специфические неоднородности мелкомасштабных течений на шельфе в области влияния придонной конвекции // ДАН. 2009. Т. 429. № 1. С. 110–114.
2. *Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы в современной океанологии // Новые идеи в океанологии. Т. 1: Физика. Химия. Биология М.: Наука, 2004. С. 55–117.
3. *Bondur V.G.* Complex satellite monitoring of coastal water areas // Proc. of 31 Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, St. Petersburg, 2005, www.isprs.org. 7 p.
4. *Bondur V., Keeler R., Gibson C.* Optical satellite imagery detection of internal wave effects from a submerged turbu-

- lent outfall in the stratified ocean // *Geoph. Res. Lett.* 2005. V. 32. L12610, doi: 10.1029/2005GL022390.
5. Bondur V., Keeler R., Vithanage D. Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // *Sea Technology*. 2004. V. 45. P. 53–58.
  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., Киллер Р.Н., Старченков С.А. и др. Мониторинг загрязнений прибрежных акваторий океана с использованием многоспектральных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения // *Исследование Земли из космоса*. 2006. № 6. С. 42–49.
  8. 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.
  9. Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д. Спектральные характеристики короткопериодных внутренних волн на Гавайском шельфе // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2009. Т. 45. № 5. С. 641–651.
  10. Bondur V., Grebenuk Yu., Sabinin K. Thin vortexes in the current field of Mamala Bight (Hawaii) // *Proc. of Int. Conf. Fluxes and structures in fluids*. Moscow: IPMech, 2009. P. 23–24.
  11. Андреева И.Б. Звукорассеивающие слои – акустические неоднородности толщи вод океана // *Акуст. журн.* 1999. Т. 45. № 4. С. 437–444.
  12. Чиндонова Ю.Г., Шулепов В.А. Звукорассеивающие слои как индикаторы внутренних волн в океане // *Океанология*. 1965. Т. V. № 6. С. 550–554.
  13. Коняев К.В., Сабинин К.Д. Волны внутри океана. С.-Пб.: ГИМИЗ, 1992. 272 с.
  14. *Acoustic Doppler Profiler. Software Manual*, 2000. Ver. 6.42. P. 1–30.
  15. Степанова Е.В., Чашечкин Ю.Д. Анизотропный перенос примеси в составном вихре // *ДАН*. 2008. Т. 423. № 4. С. 474–478.
  16. Каримова О.А., Зекеер И.С. Вода под водой // *Природа*. 2007. № 9. С. 28–32.

## Fine Vortex Columns on the Shelf in the Area of Bottom Convection Influence

V. G. Bondur<sup>a</sup>, Yu. V. Grebenyuk<sup>a</sup>, S. I. Muyakshin<sup>b</sup>, and K. D. Sabinin<sup>c, d</sup>

<sup>a</sup> *Aerokosmos Scientific Center of Aerospace Monitoring, Gorokhovskii per. 4, Moscow, 105064 Russia*

*e-mail: vgbondur@aerocosmos.info, grebenyk@gmail.com*

<sup>b</sup> *Nizhni Novgorod State University, pr. Gagarina 23, Nizhni Novgorod, 603950 Russia*

*e-mail: serg\_mun@list.ru*

<sup>c</sup> *Andreev Institute of Acoustics, Russian Academy of Sciences, ul. Shvernika 4, Moscow, 117036 Russia*

<sup>d</sup> *Institute for Space Research, Russian Academy of Sciences, ul. Profsoyuznaya 84/32, Moscow, 117810 Russia*

*e-mail: ksabinin@yandex.ru*

Received April 12, 2010

**Abstract**—This paper analyzes the results of investigations into extremely large releases of current velocities registered by an acoustic Doppler profiler during experiments performed on the Hawaii shelf. An integral analysis of the variability of current fields relies on the profile data of current velocities, temperature, and acoustic-scattering layers. Based on these investigations, we proposed a hypothesis stating that the small-scale variability of currents in profiler data is conditioned by the passage of fine vortices emerging in the outflow and rise of freshened waters from a subsurface sink near the shelf edge. To confirm this hypothesis on the emergence mechanism of the observed releases of current velocities, we conducted a mathematical simulation of the response that the Doppler meter has to the passage of fine vortex, which revealed a good agreement between model calculations and experimental data. Similar phenomena were also found in the Gelendzhik Bay of the Black Sea.

**Keywords:** Doppler profiler, velocity profile, soliton, isotherm, internal wave, isotherm, vortex column, bottom convection.