

В. Г. Бондур, Ю. В. Гребенюк, К. Д. Сабинин

Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “Аэрокосмос”,
Россия, 105064, Москва, Гороховский пер.4, E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

МЕЛКОМАСШТАБНЫЕ ВИХРЕВЫЕ СТОЛБЫ НА МОРСКИХ ШЕЛЬФАХ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ ПРИДОННОЙ КОНВЕКЦИЕЙ

АННОТАЦИЯ

Измерения скоростей течений, выполненных с помощью донных акустических профилометров (ADCP) на шельфах вблизи Гонолулу (Гавайи) и Геленджика (Черное море), позволили установить наличие весьма специфических высокочастотных особенностей течений, спорадически возникающих в водном столбе. Эти особенности проявляются в виде резких изменений скорости течений с одновременным поворотом вектора течения. Такие обнаруженные специфические выбросы скоростей течений обусловлены прохождением тонких (компактных) вихрей через лучи ADCP. Математическое моделирование отклика ADCP на прохождение колоннообразных вихрей, диаметры которых меньше глубины моря, подтвердило эту гипотезу. Источником наблюдаемых выбросов течений являются интенсивные глубинные стоки пресных вод через заглубленные коллекторы на морских шельфах.

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ГАВАЙСКОМ ШЕЛЬФЕ И АНАЛИЗА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

В течение ряда лет (2002-2004 г.) на Гавайском шельфе в акватории б. Мамала у о.Оаху проводились комплексные исследования антропогенных воздействий на экосистемы прибрежных акваторий, вызванных заглубленными стоками [1-5]. В ходе этих работ в течение длительного времени измерялись характеристики полей течений и температуры с помощью заякоренных термогирлянд и донных акустических профилометров течений (ADCP). Расположение станций, на которых проводились измерения вертикальных профилей температуры (станции Ат, Вт, Ст) и 3-х составляющих вектора течений (станции Ав, Вв, Св), показано на рис.1. Скорости течений измерялись с дискретностью по глубине 2 м и по времени - 1 мин. Измерения температуры воды проводились дискретностью 0.5 - 2 мин.

Анализ характеристик полей течений выявил наличие сильных выбросов в их скоростях, вероятность появления которых существенно превышает значения для гауссового процесса [6-8]. Экстремальные выбросы скоростей течений наблюдались на всех станциях в период измерений как в исходных полях течений, так и в их высокочастотных составляющих (выше 10 ц/час). Для уменьшения ошибок применялась процедура сглаживания данных измерений по глубине (сглаживание по 10 м). Амплитуда выбросов горизонтальных скоростей течений достигала ± 30 см/с при среднеквадратической ошибке измерений (СКО) ~ 4 см/с, а их длительность не превышает 2 мин.

В результате проведенного анализа выявлены как однополярные выбросы (положительные или отрицательные импульсы) так и биполярные, когда смена полярности импульса происходит через интервал дискретизации, равный 1 мин. При этом, биполярные импульсные всплески течений проявлялись значительно реже, чем однополярные, хотя они вызывают наибольший интерес.

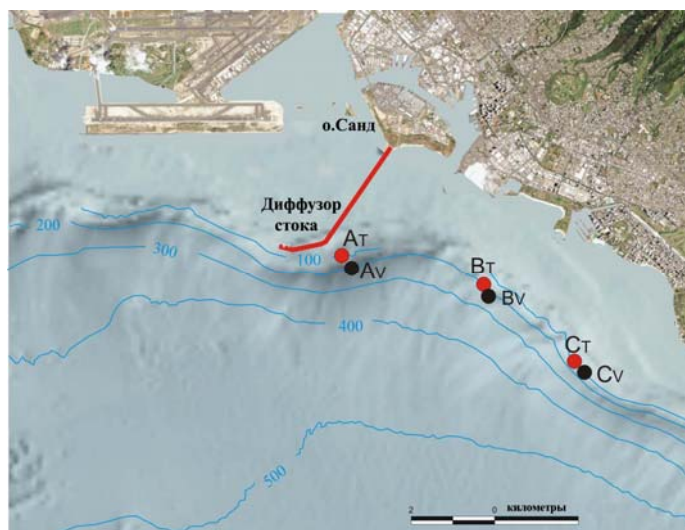


Рис.1 Схема расположения станций измерения температуры (Ат,Вт,Ст) и скоростей течений (Ав, Вв, Св) в б. Мамала (Гонолулу, Гавайи).

При выяснении причин появления сильных выбросов скоростей течений прежде всего проверялось, не вызваны ли они прохождением солитонов внутренних волн. С этой целью с использованием ежеминутных профилей течений и температуры проводился комплексный анализ характеристик скоростей как в солитонах, так и в биполярных выбросах течений. Отличительной особенностью солитонов от наблюдаемых выбросов течений является то, что в них экстремумы вертикальных скоростей наблюдаются по обе стороны от максимума горизонтальной скорости [9].

Поскольку выбросы в записях скоростей течений могли быть связаны и с собственными движениями рассеивающих звук организмами (зоопланктон, косяки рыб), особое внимание обращалось на отсутствие всплеск рассеяния на всех лучах ADCP. Представляется маловероятным также появление ошибочных всплесков одновременно на многих горизонтах.

Примеры типичных биполярных импульсных всплесков скоростей течений, зарегистрированных на станциях наблюдений на Гавайском шельфе, приведены на рис.2 а,б,в.

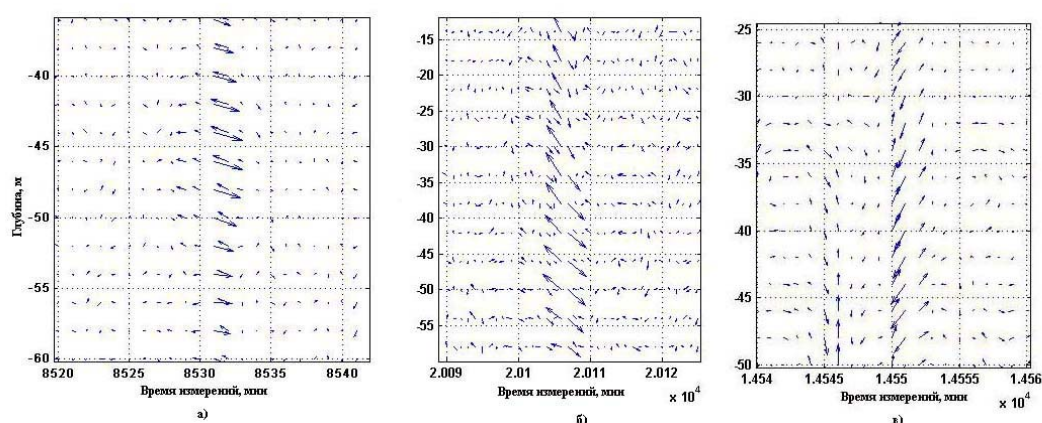


Рис. 2 а,б,в. Примеры наблюдения биполярных импульсных всплесков высокочастотных составляющих скоростей течений на станциях Av (а), Bv (б), Cv (в).

Из анализа представленных рисунков видно, что слабые хаотические высокочастотные течения внезапно сменялись течениями, резко усилившимися и одинаково направленными почти во всей водной толще. Причём, направление течений скачкообразно менялось на противоположное уже на следующей минуте. Следует отметить, что в отличие от солитонов

моменты всплесков горизонтальных скоростей совпадают с моментами экстремумов вертикальной скорости.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА 3-Х ЛУЧЕВОГО ADCP НА ПРОХОЖДЕНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР НА ГАВАЙСКОМ ШЕЛЬФЕ

Для объяснения выявленных выбросов была предложена гипотеза о том, что специфические проявления мелкомасштабной изменчивости течений в данных ADCP, полученных на шельфе в области влияния заглубленного стока, скорее всего, связаны с тонкими вихрями (вихревыми столбами), возникающими при истечении и подъёме распреснённых сточных вод, сбрасываемых из диффузора [6-8]. Для ее обоснования необходимо выяснить, как отобразится в показаниях ADCP прохождение через его лучи такого тонкого вихря. Акустический доплеровский профилометр представляет собой 3-х или 4-х лучевой импульсный гидролокатор [10]. Его лучи расположены симметрично относительно вертикальной оси и отклонены от нее на одинаковые углы. Принятый для каждого луча эхо-сигнал анализировался в примыкающих друг к другу временных окнах с целью выделения доплеровского сдвига частоты, который пропорционален проекции скорости рассеивателей относительно антенны на ось луча.

В основу алгоритма обработки данных акустического доплеровского профилометра течений было положено предположение о постоянстве скорости течения во всех элементах дальности, находящихся на определенной глубине. Скорости течений измеряются с помощью ADCP правильно только в том случае, когда масштаб неоднородностей течения существенно больше расстояния между его лучами [10]. Минутные скачки скорости в показаниях ADCP не могут быть связаны с достаточно большими пространственными масштабами и поэтому сигнализируют лишь о неоднородности поля течений между лучами ADCP. Поэтому, строго говоря, с помощью ADCP 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. Под откликом ADCP будем понимать временные реализации трех проекций скорости течения на оси прямоугольной системы координат, связанной с прибором.

Чтобы смоделировать зависимости выходных величин прибора от времени, нужно рассчитать, как изменяются эти проекции при разных положениях вихря относительно прибора. В качестве модели вихря был взят «вихрь Рэнкина», который представляет 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 $V=V(R_0)R_0/R$. При проведении расчетов задавались значения вихря $R_0=5$ м и $V_{max}=0.5$ м/с.

Для моделирования отклика ADCP на прохождение вихря была разработана схема расчета проекций скорости жидкости на лучи прибора в зависимости от расстояния вихря до центра прибора и элементов дальности.

Отклик ADCP на прохождение вихря зависит от многих параметров – от направления вращения вихря, скорости и направления его перемещения, положения траектории вихря относительно ADCP, ориентации лучей вихря, от дискретности измерений и даже от того, в какие моменты прохождения вихря над ADCP 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, что прохождение узких вихрей через лучи ADCP приводит к

появлению резких выбросов в скоростях течений, измеряемых прибором. Амплитуда выбросов и их вид (однополярные, биполярные) зависят от расположения вихря относительно ADCP и направления его перемещения.

На рис.3 а,б приведено сравнение модельных расчетов (рис.3 б) с данными натурных измерений скоростей течений (рис.3 а), выполненных в точке Вv в 2004 г. (на 20095-20115 мин. измерений).

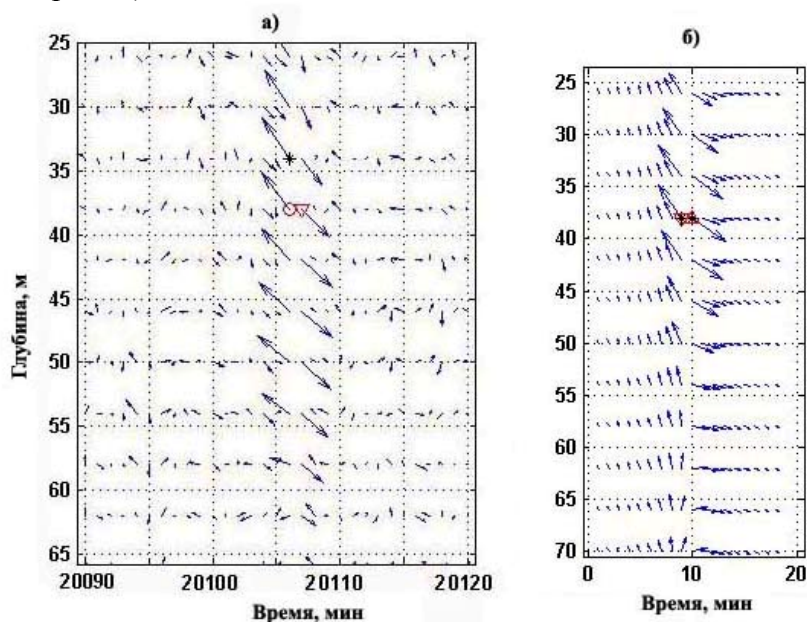


Рис.3 а,б. а) импульсная вспышка высокочастотных (выше 10 ц/час) течений, зарегистрированная на 20106-ой минуте измерений в точке Вv, положение максимума скорости отмечено звездочкой, экстремумы вертикальной скорости - кружком и треугольниками, соответственно; б) вектора течений по модели отклика ADCP на антициклональный вихрь Рэнкина с радиусом 5 м и максимальным значением скорости 0.5 м/с, проходящего мимо ADCP на восток-юго-восток со скоростью 0.2 м/с.

Среди многих рассмотренных вариантов наилучшее соответствие модели с экспериментом был достигнуто в случае, когда антициклональный вихрь с указанными выше параметрами двигался на восток-юго-восток. Необходимо отметить, что при других вариантах прохождения модельного вихря относительно прибора отклик ADCP мог существенно изменяться, приобретая вид и одиночной вспышки, и менее значительного поворота вектора в двойном импульсе, но в большинстве случаев такой поворот происходил за 1-2 мин. Анализ рис. 3 а,б показывает хорошее соответствие модельных расчетов и данных натурных измерений, что подтверждает справедливость выдвинутой гипотезы.

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА ГЕЛЕНДЖИКСКОМ ШЕЛЬФЕ

Для подтверждения гипотезы о механизме возникновения сильных выбросов скоростей течений, обнаруженных по результатам исследований на Гавайском шельфе, осенью 2009 г. были проведены измерения скоростей течений на Геленджикском шельфе вблизи глубоководного стока. На Геленджикском шельфе, так же как и на Гавайском, в море сбрасываются отработанные воды по заглубленному трубопроводу. Вытекающая из трубопровода струя почти пресных вода всплывает в виде плюма, т.к. она легче окружающих более солёных вод. В таком конвективном плюме можно ожидать возникновение вихревых структур, подобных обнаруженным на Гавайском шельфе.

Карта района исследований приведена на рис.4. Исследования проводились с использованием комплекса гидрофизической аппаратуры, включающей STD зонд,

заякоренную термистерную гирлянду, распределенный датчик температуры, буксируемый и донный акустические профилометры течений ADCP.

На рис.4 показано расположение подводного коллектора, по которому происходит сброс в море у г. Геленджик. Донный ADCP, с помощью которого проводились измерения течений на Геленджикском шельфе, был установлен вблизи конца сточной трубы на глубине 31.5 м. Место расположения донного профилометра на рис.4 отмечено звездочкой. Измерения проводились в период с 6 по 10 октября 2009 г.

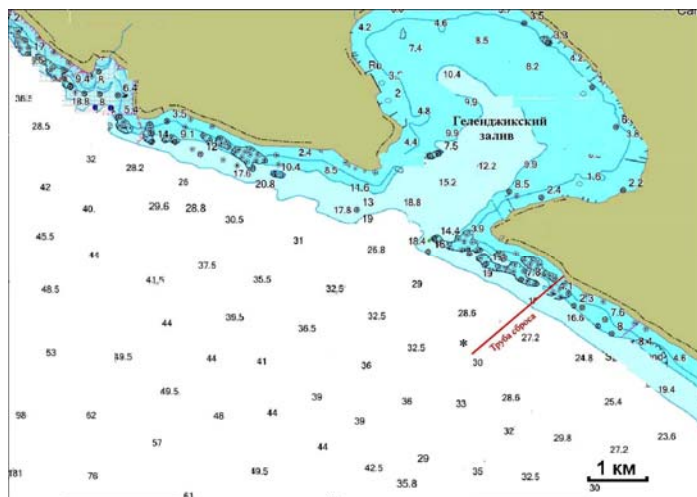


Рис.4. Карта района Черноморского шельфа, где проводились гидрофизические измерения.

Анализ данных измерений, выполненных с помощью 4-х лучевого ADCP в акватории Геленджикской бухты, выявил наличие больших выбросов в полях скоростей течений, вероятность появления которых существенно превышает значения для гауссового процесса. Экстремальные выбросы скоростей течений происходили как в исходных полях течений, так и в их высокочастотных составляющих (выше 1 ц/час). Для уменьшения ошибок проводилось сглаживание данных по глубине (по 4 м) низкочастотным фильтром Баттеруорта.

Анализ выбросов в высокочастотных составляющих течений показал, что амплитуда выбросов горизонтальных течений достигает ± 15 см/с при среднеквадратической ошибке измерений (СКО) ~ 1.72 см/с, а их длительность не превышает 2-3 мин. Наблюдались однополярные выбросы, так и двухполярные, когда направление течения меняется на противоположное за 1-2 мин. При анализе выбросов обращалось внимание на отсутствие всплесков рассеяния на всех лучах ADCP, вызванных собственными движениями рассеивающих звук организмов.

За период выполнения измерений в Геленджикской бухте произошло существенное изменение направления и скорости течений в месте установки донного профилометра. С 6 по 8 октября 2009 г. (отсчеты с 1 по 3300 мин) осреднённые по глубине фоновые течения имели северо-западное направление со скоростями 10-20 см/с, которое в дальнейшем сменилось на противоположное юго-восточное (рис. 5). Наблюдаемое изменение направления течений было вызвано прохождением крупномасштабного вихря, которые часто наблюдаются в прибрежной зоне Черного моря [9,10].

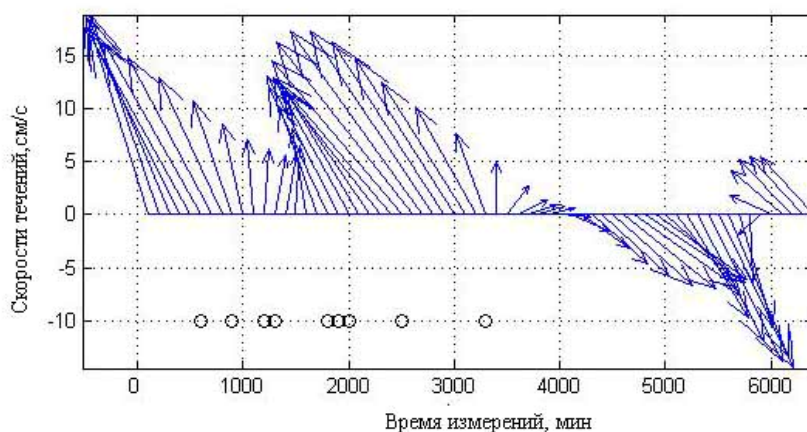


Рис. 5. Скорости баротропных (осреднённых по глубине) низкочастотных течений в акватории Геленджикской бухты по данным измерений донным ADCP с 6 по 10 октября 2009 г. Кругами обозначены моменты наблюдения хорошо выраженных двухполярных импульсов.

Анализ сильных и резких выбросов скоростей течений, одновременно возникавших на многих горизонтах, показал, что они проявлялись только в период с 6 по 8 октября 2009 г., когда течения имели северо-западное направление. Этот результат полностью объясним с точки зрения предложенного механизма образования выбросов в зоне прибрежной конвекции.

Как видно из рис.4, донный ADCP был установлен на небольшом расстоянии к северо-западу от выходного отверстия заглубленного коллектора. Под действием северо-западных течений всплывающие струи сбрасываемых вод переносились к профилометру, где под действием развивающейся конвекции образовывались вихри, вызвавшие появление выбросов в данных ADCP. После смены направления течений на юго-восточное конвективный плюм уже не переносился к ADCP и вихри не возникали.

Примеры наблюдения экстремально больших биполярных выбросов скоростей течений на Геленджикском шельфе приведены на рис. 6 а-в. Выбросы появлялись на фоне слабых хаотических высокочастотных флуктуаций, когда течения резко усиливаются почти во всей водной толще, причём их направление скачкообразно меняется на противоположное уже через 1-2 минуты.

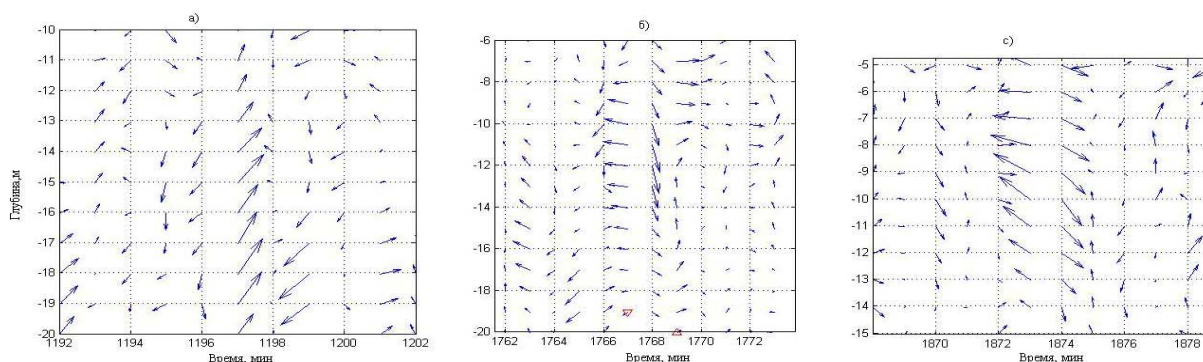


Рис.6 а,б,в. Примеры наблюдения сильных биполярных импульсных вспышек высокочастотных составляющих скоростей течений (более 1 ц/час) в моменты времени измерений: а) $t=1192-1202$ мин; б) $t=1760-1774$ мин; в) $t=1868-1878$ мин.

Совместный анализ характеристик полей течений, интенсивности рассеянного акустического сигнала, вертикальных профилей температуры и плотности морской воды

позволил установить, что наблюдаемые выбросы скоростей течений не вызваны ни косяками рыб, ни внутренними волнами, которые в это время не могли существовать из-за почти полной однородности всего слоя воды над ADCP.

С помощью 4-х лучевого профилометра определялись не только скорости течений, но и величины погрешности («ошибок») их измерений. Проведенный анализ показал, что моментам наблюдения больших выбросов скоростей течений на рис.6 соответствуют максимальные значения «ошибок» измерений. Это свидетельствует о том, что наблюдаемые большие скорости течений являются фиктивными и вызваны неоднородностью поля течения в пределах области измерений ADCP. Прохождение небольшого вихревого образования через луч ADCP приводит к возникновению выбросов скоростей течений в измерениях профилометра.

Следует отметить, что частота наблюдения двухполярных выбросов на Геленджикском шельфе была существенно ниже, чем на Гавайском шельфе. Возможно, это связано с меньшим объемом вод, сбрасываемых в море. Кроме того, сбрасываемые воды вытекали не только из выходного отверстия, но и из нескольких щелей поврежденного коллектора. Это продемонстрировали результаты измерений интенсивности рассеянного акустического сигнала с помощью буксируемого ADCP, которые позволили выявить вытекание загрязненных вод из нескольких щелей сбросового устройства.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА 4-Х ЛУЧЕВОГО ADCP НА ПРОХОЖДЕНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР НА ГЕЛЕНДЖИКСКОМ ШЕЛЬФЕ

С целью подтверждения выдвинутой гипотезы о механизме возникновения наблюдаемых выбросов скоростей течений на Геленджикском шельфе было проведено математическое моделирование прохождения тонкого вихря через лучи 4-х лучевого профилометра. В качестве модели вихря, как и в случае Гавайских экспериментов, был взят «вихрь Рэнкина». При проведении расчетов задавались значения радиуса вихря в диапазоне от 4 до 10 м, что существенно меньше расстояния между его лучами.

Поскольку интересующие нас вихри, скорее всего, связаны с конвективными движениями во всплывающих плюмах сбрасываемых пресных вод, то естественно считать, что в центральной части вихря преобладают восходящие потоки, сменяющиеся на нисходящие движения на его периферии. При расчетах в вихре задавалась смена вертикальных течений от +2 см/с в центральной части вихря до -1 см/с на его периферии.

Были выполнены расчеты скоростей течений для широкого диапазона значений параметров вихря, которые показали, что прохождение узких вихрей через лучи ADCP приводит к появлению в его данных резких выбросов скоростей течений. Амплитуда выбросов и их вид (однополярные, биполярные) зависят, прежде всего, от расположения вихря относительно ADCP, скорости и направления его перемещения.

На рис.7 а,б приведено сравнение модельных расчетов величин скоростей течений и ошибок измерений (рис.7 а) с данными натурных наблюдений на 1192-1202 мин. измерений (рис.7 б). На этом рисунке векторы течений изображены стрелками, а «ошибки» измерений скоростей представлены в цветовом коде. Наилучшее согласие модельных оценок с наблюдениями высокочастотных течений было получено для условий, когда антициклонический вихрь с радиусом 8 м двигался в северо-западном направлении со скоростью 0.15 м/с. Такое движение вихря несколько отличается от пассивного переноса фоновым течением, равного 0.07 м/с и направленного на север.

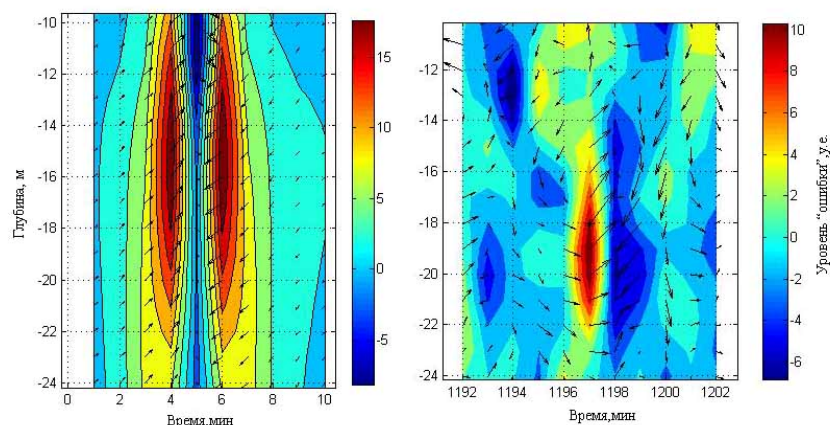


Рис.7 а,б. Сравнение результатов модельных расчетов и натуральных измерений по параметрам течений (стрелки) и «ошибкам» измерений (цветовой код): а) модельный отклик ADCP на антициклонический вихрь с радиусом 8 м, движущийся в северо-западном направлении со скоростью 0.15 м/с; б) данные натуральных измерений течений на 1192-1202 мин. наблюдений.

Следует отметить, что реальный вихрь не может полностью соответствовать упрощенной модели, тем более, что форма конвективных плюмов, в которых рождаются вихревые столбы, может отличаться от вертикального цилиндра [13]. Поэтому даже качественное совпадение картины векторов, меняющих направление на противоположно за 2 минуты, при изменении погрешности «ошибки» с положительных на отрицательные значения за 1 минуту в модели и наблюдениях, позволяет считать, что над ADCP проходил компактный антициклонический вихрь с указанными выше параметрами. Весьма вероятно, что и другие наблюдаемые импульсы связаны с вихревыми образованиями, а их отсутствие во второй половине измерений вполне согласуется со сменой направления фоновых течений с северо-западного на юго-восточное.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментальных исследований характеристик экстремальных выбросов скоростей течений на Гавайском и Геленджикском шельфах и данные математического моделирования показывают, что специфическое проявление мелкомасштабной изменчивости скоростей течений в данных профилометра связано с вихреобразованием в конвективных плюмах глубинных стоков пресных вод. Образование вихрей в районах глубоководных стоков в морскую среду происходит вне зависимости от того, существует ли плотностная стратификация в области выброса или нет. В обоих случаях – и на Гавайском и на Геленджикском шельфах – наблюдались узкие антициклональные вихревые столбы с орбитальными скоростями до десятков см/с и диаметрами, существенно меньшими расстояния между лучами измерителя.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

R_0 - радиус вихря, м;

R - расстояние до центра вихря, м;

V - скорость вихря, см/с;

V_{max} - максимальное значение скорости вихря, см/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bondur V.G. Satellite monitoring and mathematical modelling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // In Tech «Waste Water», Rijeka 2011, pp. 155-180.

[http:// www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas](http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas)

2. Bondur V.G. Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas//Proc. of 31 Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, St.Petersburg, 2005.
3. 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.
4. Бондур В.Г., Киллер Р.Н., Старченков С.А., Рыбакова Н.И. Мониторинг загрязнений прибрежных акваторий океана с использованием многоспектральных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения //Исследование Земли из космоса. 2006. № 6. С. 42-49.
5. Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д. Изменчивость внутренних приливов в прибрежной акватории о.Оаху (Гавайи). Океанология, 2008, том 48, № 5, С. 661-671.
6. 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.
7. V. Bondur, Yu. Grebenuk, K. Sabinin. Thin vortexes in the current field of Mamala Bight (Hawaii) // Proc. of Int.Conf. Fluxes and structures in fluids, Moscow, June, 2009.
8. Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Муякшин С.И., Сабинин К.Д. Тонкие вихревые столбы на шельфе в области влияния придонной конвекции //Известия РАН. ФАО 200, том 47, № 2, с. 1-9
9. Коняев К.В., Сабинин К.Д. Волны внутри океана. С.-Петербург, ГИМИЗ, 1992, С 272
10. ADCP Coordinate Transformation: Formulas and Calculations // TELEDYNE RD INSTRUMENTS, P/N 951-6079-00 (January 2008).
11. Овчинников И.М., Титов В.Б. Антициклоническая завихренность течений в прибрежной зоне Черного моря. // ДАН, 1990. Т.314. №5. С.1236-1239.
12. Zatsepin A.,V. Kremenetskiy, A.Korzh, A. Ostrovskii. Submesoscale eddies at the narrow shelf: observations at the Black Sea // Proceed. 2nd Int. Conference “Dynamics of coastal zone of non-tidal seas”. Kaliningrad. Terra Baltica. 2010. P.305-310.
13. Wood I.R, Bell R.G, Wilkinson D.L. Ocean disposal of wastewater. World Scientific. 1993. P.425.