

УДК 551.465, 551.466

СПЕЦИФИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ШЕЛЬФЕ В ОБЛАСТИ ВЛИЯНИЯ ПРИДОННОЙ КОНВЕКЦИИ

© 2009 г. Академик В. Г. Бондур, Ю. В. Гребенюк, К. Д. Сабинин

Поступило 19.05.2009 г.

Анализ изменчивости полей скоростей течений на шельфе, выполненный в процессе исследований антропогенных воздействий на экосистемы прибрежных акваторий, позволил выявить появление резких всплесков течений специфической структуры в области влияния заглуженного стока вод пониженной солености. Установлено, что сильные кратковременные выбросы, превышающие среднеквадратическую ошибку измерений в 3–4 раза, эпизодически появляются на шельфе о. Оаху (Гавайи), охватывая почти всю водную толщу, а их вероятность существенно превышает значения, характерные для гауссового процесса. Исследование этих выбросов с привлечением данных об изменчивости звукорассеивающих слоев и температуры воды позволило прийти к выводу о том, что наблюдаемые явления вызваны прохождением тонких вихрей, связанных с конвекцией, обусловленной подъемом опресненных вод пониженной солености из придонных слоев океана.

Особенности экспериментальных исследований. В акватории о. Оаху (Гавайские о-ва) в течение ряда лет проводились комплексные исследования антропогенных воздействий на экосистемы прибрежных акваторий, вызванных заглуженным стоком [1–5]. В ходе этих работ на краю шельфа в течение многих суток измерялись вариации скоростей течений и температуры с помощью заякоренных термогирлянд и донных акустических профилографов (ADP) [4, 5]. Расположение станций, на которых проводились измерения вертикальных профилей температуры (станции At, Bt, Ct, Dt) и трех составляющих вектора скоростей течений (станции Av, Bv, Cv), показано на рис. 1. Течения измерялись на глубинах от 4 до 76 м с дискретностью по глубине 2 м и по времени — 1 мин. Измерения температуры воды проводились на разных горизонтах

от 3–18 до 45–76 м с дискретностью 2–5 мин в 2002–2003 гг. и 30 с в 2004 г.

На Гавайском шельфе в бухте Мамала, как и на других шельфах, встречаются короткопериодные внутренние волны, наиболее мощные из которых связаны с внутренними солитонами, сопровождающимися резкими изменениями полей течений и глубины термоклина [6, 7]. Временные масштабы этих изменений обычно измеряются несколькими десятками минут, хотя в особенно интенсивных солитонах сильные изменения параметров среды происходят за несколько минут. В то же время на шельфе бухты Мамала встречаются и еще более резкие изменения, отражающиеся в записях ADP в виде сильных импульсных всплесков скоростей течений, меняющих направление на противоположные всего за одну минуту.

Результаты исследований и их анализ. Анализ данных измерений ADP в бухте Мамала выявил наличие больших выбросов в скоростях течений, вероятность появления которых существенно превышает значения, характерные для гауссового процесса. Экстремальные выбросы скоростей течений фиксировались на всех станциях за весь период измерений. Пример на-

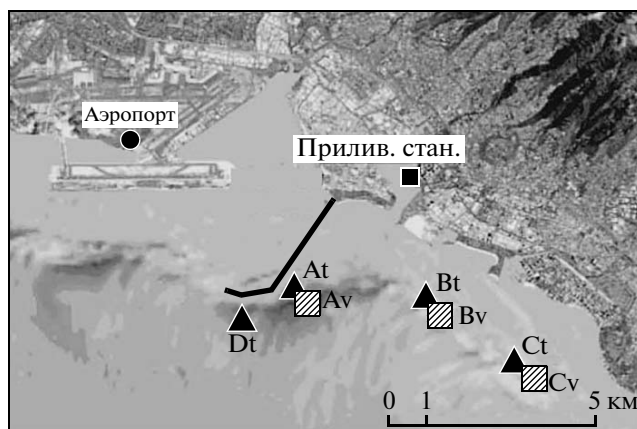


Рис. 1. Схема расположения в бухте Мамала станций измерения температуры и скоростей течений.

Научный центр аэрокосмического мониторинга
“Аэрокосмос”, Москва

Институт космических исследований
Российской Академии наук, Москва

блюдения сильного выброса в высокочастотной составляющей течения на ст. Av в 2003 г. представлен на рис. 2. Из приведенного рисунка видно, что амплитуда выброса горизонтальной составляющей течения V достигает ± 25 см/с при среднеквадратической ошибке измерений (СКО) ~ 4 см/с, а длительность выброса не превышает 2 мин.

Некоторые из наблюдаемых вспышек течений могли быть вызваны прохождением солитонов внутренних волн, которые сопровождаются смещением глубин изотерм и звукорассеивающих слоев (ЗРС).

На представленных ниже рисунках приведены примеры обоих типов резкой изменчивости водной среды в бухте Мамала. Ежеминутные профили течений измерялись с помощью донных ADP, установленных вблизи кромки шельфа, а колебания температуры — на термогирляндах, заякоренных неподалеку от ADP (рис. 1).

В солитоне, зарегистрированном в точке Bv в 2004 г. (рис. 3), вблизи 13560-й минуты измерений (начало измерений — 10 ч 59 мин 20 августа 2004 г.) термоклин взмыл на 18 м вверх всего за 3 мин, 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 вершин $+4$ и -5 см/с, наблюдались по обе стороны от максимума горизонтальной скорости, как это и должно быть в солитонах [9].

Типичная импульсная вспышка скорости течений, зарегистрированная в точке Av в 2003 г. на 8531–8532-й минутах измерений, изображена на рис. 4. Здесь, как и в других случаях подобных вспышек, наблюдавшихся на всех ADP, слабые хаотические высокочастотные течения внезапно сменялись течениями, резко усилившимися и одинаково направленными почти во всей водной толще, причем это направление скачкообразно менялось на противоположное уже на следующей минуте.

Только в экспериментах, проведенных в 2004 г., было зарегистрировано 25 подобных импульсных вспышек. Но более резкое по сравнению с солитонами изменение течений — не единственная характерная особенность зигзагообразных импульсных вспышек. В отличие от солитонов моменты экстремумов вертикальной скорости здесь совпадают с моментами экстремумов горизонтальной скорости, а на изотермах в эти минуты вертикальные движения не обнаруживаются, так как измерения температуры производились на расстоянии более 100 м от точки измерений профилей течений.

Наблюдавшиеся всплески скоростей течений можно было бы принять за ошибки измерений,

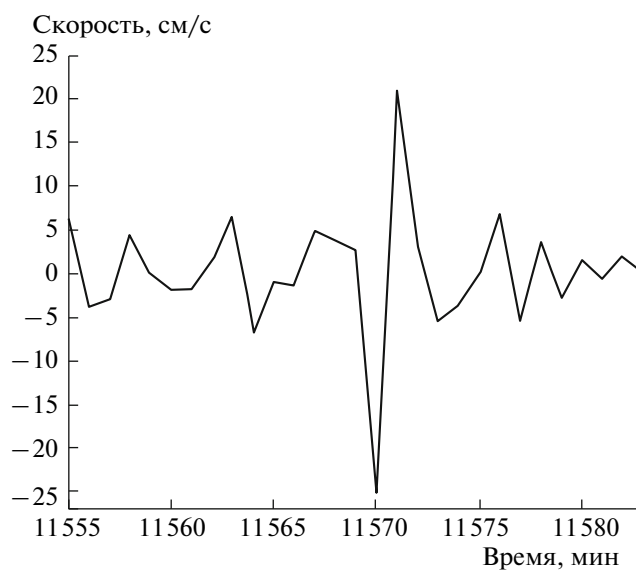


Рис. 2. Сильная импульсная вспышка в высокочастотной (выше 10 цикл/ч) составляющей течения V на ст. Av в 2003 г. на глубине 40 м.

если бы не некоторые особенности, позволяющие усомниться в таком слишком простом объяснении. Прежде всего, представляется маловероятным, чтобы такие ошибки возникали одновременно на многих горизонтах, как это видно на рис. 4. Сильные выбросы наблюдаются как в исходных значениях течений U , V , W , так и в их высокочастотных составляющих.

О частоте наблюдения импульсных вспышек скоростей течений в исследуемой акватории можно судить по результатам анализа течений, измеренных в течение 19 дней на ст. Bv в 2004 г. (27370 отсчетов с дискретностью 1 мин). Для уменьшения ошибок использовались данные, сглаженные по глубине низкочастотным фильтром Баттеруорда третьего порядка с частотой среза 100 ц/км (сглаживание по 10 м). Всего на этой станции на глубинах 12–70 м было зафиксировано 920 импульсов, удовлетворяющих условию превышения их амплитуды над среднеквадратической ошибкой измерений (СКО) 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%).

Ошибки измерений оценивались по уровню белого шума на спектрах течений, для расчета которых использовались данные, сглаженные по глубине низкочастотным фильтром Баттеруорда третьего порядка с частотой среза 100 ц/км (сглаживание по 10 м). При таком сглаживании СКО составляли около 4 см/с для горизонтальной и 1 см/с для вертикальной скорости. Другим важ-

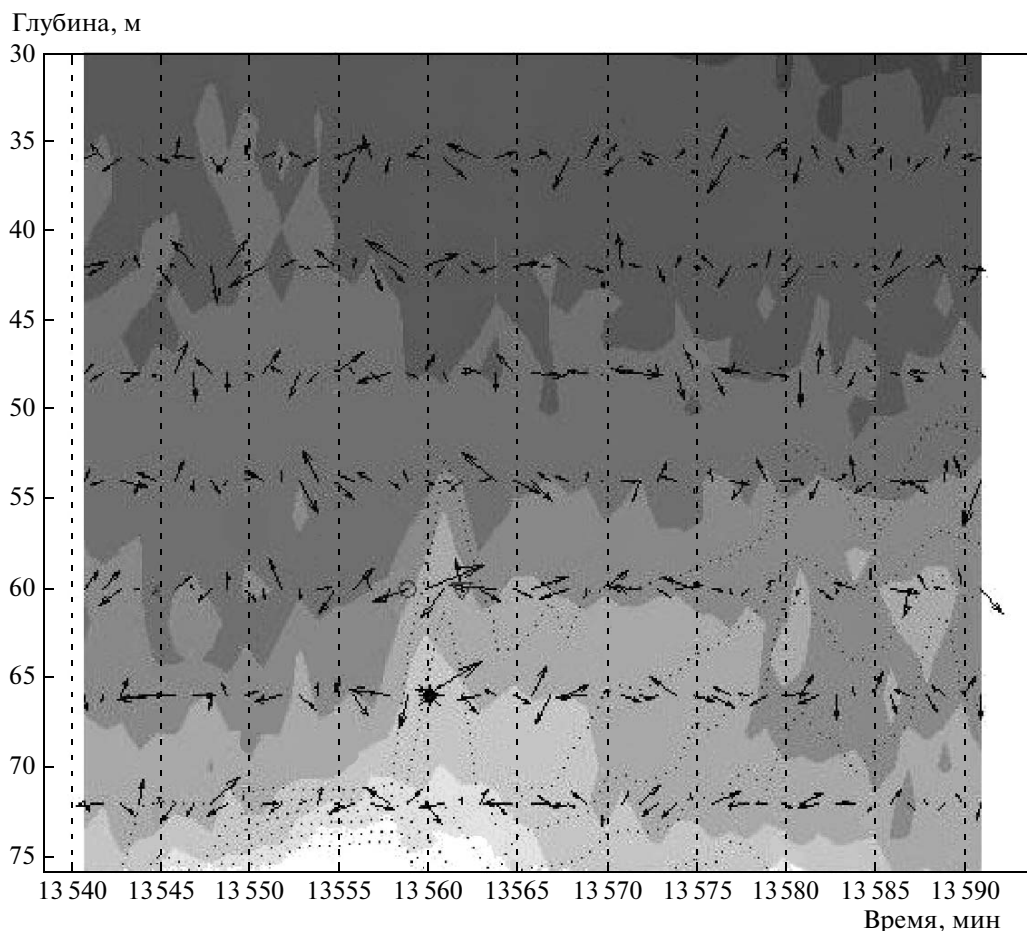


Рис. 3. Проявление типичного солитона в бухте Мамала в поле течений, температуры и ЗПС. Изображены векторы течений (стрелки, север вверх). Положение максимума скорости, равного 15 см/с, отмечено звездочкой, а экстремумов вертикальной скорости, равных +4 и –5 см/с, кружком и треугольником соответственно. Интенсивность рассеянного акустического сигнала показана теневой картиной. Изотермы (пунктир) построены по данным термогирлянды, заякоренной вблизи от ADP.

ным признаком зигзагообразных импульсов считались большие значения разности соседних векторов (больше 4 СКО).

Одновременно с анализом выбросов скоростей течений проводились исследования интенсивности рассеянного акустического сигнала, регистрируемого ADP. Обращалось внимание на то, чтобы в поле, озвучиваемом ADP, не было источников, которые могли бы приводить к всплескам скорости, рассчитываемой по данным ADP. (Скопления активных рассеивателей обычно хорошо проявляются в интенсивности рассеивания сигналов ADP.)

Если бы измерения течений проводились на заякоренных гирляндах вертушек, то минутные зигзагообразные вспышки течений естественнее всего было бы связывать с переносом мелкомасштабных вихрей, полностью пересекающих гирлянду за 1 мин. При типичной скорости переноса

фоновыми течениями около 0.1–0.2 м/с это соответствует диаметру вихря около 10 м.

В случае аппаратуры ADP все гораздо сложнее, поскольку с ее помощью скорости измеряются правильно только в том случае, когда масштаб неоднородностей течения существенно больше расстояния между лучами ADP [10]. Минутные скачки скорости в показаниях этой аппаратуры не могут быть связаны с достаточно большими пространственными масштабами и поэтому сигнализируют лишь о неоднородности поля течений между лучами ADP.

Не располагая данными о течениях на различных лучах, можно предложить следующую гипотезу появления наблюдаемых импульсных вспышек в записях ADP. Объяснением наблюдавшихся зигзагообразных импульсных вспышек течений нам представляется прохождение узких вихрей через один из лучей ADP, когда вихрь касается луча своим передним краем в первый мо-

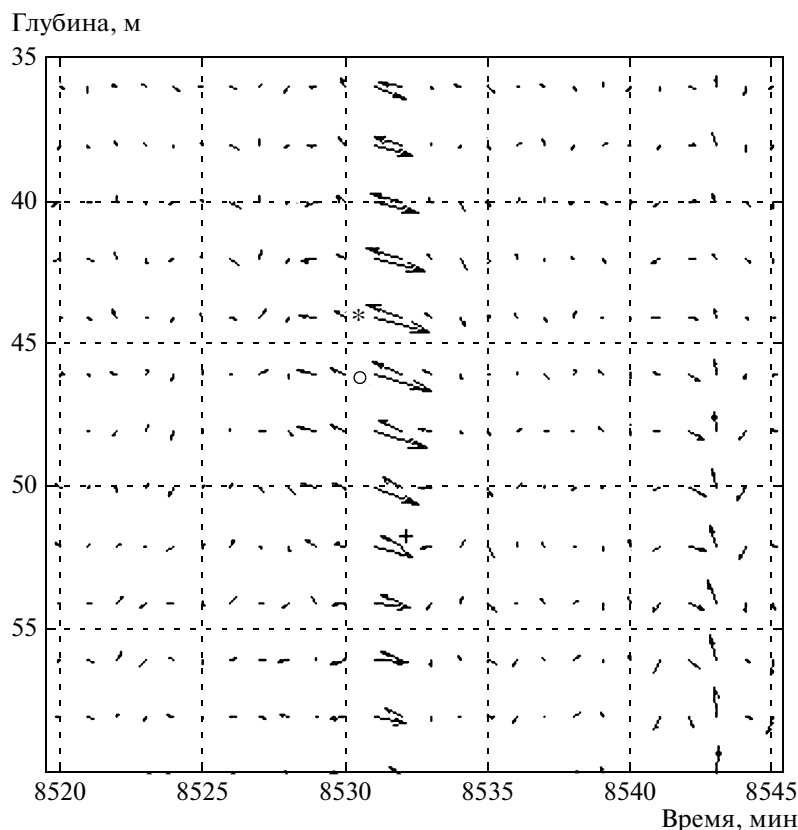


Рис. 4. Импульсная вспышка высокочастотных (выше 10 цикл/ч) течений, зарегистрированная на 8531-й минуте измерений в точке Av в 2003 г. Изображены векторы течений (стрелки, север вверх). Положение максимума скорости, равного 52 см/с, отмечено звездочкой, а экстремумов вертикальной скорости, равных 3 и –6 см/с, крестиком и кружком соответственно.

мент вспышки и задним — в последующий момент. В пользу такого предположения говорит необычное для внутренних волн совпадение моментов экстремумов вертикальных и горизонтальных скоростей. Заметим, что и сам факт регистрации на ADP синфазных изменений горизонтальных и вертикальных скоростей при отсутствии вертикальных движений термоклина (см. рис. 4) тоже говорит в пользу вихревой гипотезы.

Мы не можем исключить возможности и других интерпретаций полученных данных. Однако следует отметить, что в океане вряд ли существуют мелкомасштабные неоднородности течений, амплитуда которых была бы столь же велика, как в описанных импульсных вспышках. Даже такое резкое явление, как солитоны, имеет гораздо большие пространственные масштабы и иные соотношения между горизонтальными и вертикальными течениями.

Заключение. Появление узких вихрей на шельфе при наличии сброса распресненных вод вполне вероятно, если не неизбежно, поскольку в этом случае в воде возникает мощная конвекция, в поле которой могут появляться небольшие вих-

ри, подобные пылевым вихорькам в приземном воздухе, наблюдаемым в жаркий день над нагретыми участками суши (“пылевые дьяволы”).

Некоторое подобие такому вихреобразованию можно найти и в результатах лабораторных экспериментов по конвекции во вращающемся объеме воды, когда тонущая в воде капля более тяжелой жидкости захватывается вихрем, концентрирующим внутри себя всю примесь [10]. Такой концентрацией примеси может объясняться повышение интенсивности рассеяния внутри вихрей, часто наблюдавшееся в наших экспериментах в акватории бухты Мамала. Подобные вспышки интенсивности рассеянного сигнала будут исследоваться и в дальнейшем.

Если предложенная гипотеза о вихрях в конвективном слое подтвердится в ходе планируемых авторами дальнейших исследований, то возникнет необходимость внести коррективы в представление о чисто диффузионном распространении примесей в зоне влияния глубинных стоков вод, учтя захват и перенос примеси более или менее долгоживущими вихрями. Заметим также, что подобные явления могут возникать и в

районах выхода метана или придонной разгрузки подземных вод, как это происходит, например, у берегов Крыма и Кавказа [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бондур В.Г.* В кн.: Новые идеи в океанологии. Т. 1. Физика. Химия. Биология. М.: Наука, 2004. С. 55–117.
2. *Бондур В.Г., Филатов Н.Н., Гребенюк Ю.В. и др.* // Океанология. 2007. Т. 47. № 6. С. 827–846.
3. *Bondur V.G.* In: Proc. XXXI Intern. Symp. on Remote Sensing of Environment. St. Petersburg, 2005.
4. *Bondur V., Keeler R., Gibson C.* // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L12610. doi:10.1029/2005GL022390.
5. *Bondur V., Keeler R., Vithanage D.* // Sea Technol. 2004. V. 45. P. 53–58.
6. *Бондур В.Г., Киллер Р.Н., Старченков С.А. и др.* // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 6. С. 42–49.
7. *Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д.* // Океанология. 2008. Т. 48. № 5. С. 661–671.
8. *Коняев К.В., Сабинин К.Д.* Волны внутри океана. СПб.: ГИМИЗ, 1992. 272 с.
9. Acoustic Doppler Profiler. Software Manual. 2000. Vers 6.42. P. 1–30.
10. *Степанова Е.В., Чашечкин Ю.Д.* // ДАН. 2008. Т. 423. № 4. С. 474–478.
11. *Каримова О.А., Зекцер И.С.* // Природа. 2007. № 9. С. 28–32.