

Выявление воздействия внутренних волн, создаваемых заглубленным турбулентным сбросом сточных вод в стратифицированном океане по оптическим спутниковым изображениям

Р. Норрис Килер

Directed Technologies, Inc., Arlington, VA

Валерий Бондур

Научный центр аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС», Москва, Россия

Карл Гибсон

Scripps Institution of Oceanography, UCSD, La Jolla, CA

Получено 9 января 2005; рассмотрено 19 мая 2005; принято 20 мая 2005; опубликовано 18 июня 2005.

Яркие аномалии морской поверхности, вызванные сбросом городских сточных вод, обнаружены из космоса на площадях в тысячи раз больших чем их заглубленный источник турбулентности. Механизм задействует комплексное взаимодействие течений, топографии, приливов, вертикального и горизонтального перемешивания, внутренних волн и стратифицированной турбулентности. **Ссылка:** Keeler R.N., V.G.Bondur and C.H.Gibson (2005), Optical satellite imagery detection of internal wave effects from a submerged turbulent outfall in the stratified ocean, Geophys. Res. Lett., 32, L12610, doi: 10.1029/2005GL022390.

1. Введение

В сентябре 2002 и 2003 г. в бухте Мамаля, Гавайи, были проведены крупные международные океанографические эксперименты по дистанционному мониторингу антропогенных воздействий на прибрежные акватории. В экспериментах были задействованы спутники "Ikonos" и "QuickBird", другие космические аппараты, 10 кораблей, несколько буйковых станций и два вертолета. Целью экспериментов было комплексное исследование проявлений сброса сточных вод с о.Санд, Гонолулу в акваторию бухты Мамаля с использованием панхроматических и многоспектральных космических изображений высокого пространственного разрешения одновременно с основными и микроструктурными и другими подспутниковыми измерениями. Датчики основного и микродвижения, температуры, электропроводности и мутности развертывались с опускаемого зонда и буксируемых платформ по схемам, составленным таким образом, чтобы охарактеризовать гидродинамические параметры и стратификацию как в зоне самого стока, так и в зоне окружающих вод. Над диффузором буи устанавливались на глубине подъема сточных вод для определения траекторий конвекции создаваемых участков фоссиллизированной турбулентной микроструктуры.

2. Наблюдение спектральных аномалий яркости поверхности

На рис. 1, представлен анализ характерного фрагмента космического изображения, полученного 2 сентября 2002 г. с борта спутника "Ikonos", оборудованного оптической аппаратурой. Съемке подвергалась область акватории шириной 11 км, простирающейся на 50 км на юго-запад от о.Санд у о.Оаху. Орбита спутника "Ikonos" солнечно-синхронная, высота 680 км. Пространственное разрешение полученных изображений ~ 1 м в панхроматическом режиме и ~ 4 м в многоспектральном режиме. На фрагменте, представленном на рис. 1а, обозначено положение коллектора для сброса сточных вод, имеющего длину ~2.5 км. Через 283 отверстия 3-х секций диффузора (длиной 1 км) этого устройства, находящегося на глубине 68-70 м, сбрасываемые пресные сточные воды (расход 3-4 м³/с) поступают в акваторию бухты, где горизонтальные струи смешиваются с более плотной соленой океанской водой. При этом формируется всплывающий турбулентный плюм, который может останавливаться устойчивой стратификацией на глубине пикноклина, которая составляла 40-50 м. Остатки (реликты) турбулентности рассеиваются окружающими течениями. Может ли заглубленное поле перемещающейся фоссиллизированной турбулентности сброса быть выявлено на спутниковых изображениях, и на каком расстоянии от диффузора? Каким образом возможно это осуществлять?

Полученные космические изображения обрабатывались с использованием метода дистанционной пространственно-частотной спектроскопии [Bondur, 2000; 2004]. Метод основан на применении двумерного преобразования Фурье и специфическом анализе двумерных пространственных спектров [Bondur, Grebeniuk, 2001]. Методика основана на регистрации слабых изменений коротких поверхностных ветровых волн (< 1 м), проявляющихся на изображениях аномалий яркости поверхности, отличных от фоновых областей. Процедура состоит в распознавании областей аномалий морской поверхности, связанных с проявлениями глубинного стока и проявляющихся в виде спектров яркости изображения, отличающихся от окружающего фона поверхностного волнения. На эффект проявления глубинных стоков может влиять наличие поверхностно-активных веществ, но нефтяные ПАВ удаляются очистными сооружениями до величин менее порога обнаружения. Уровни ПАВ окружающей среды в прибрежных водах Гавайев низки и не обнаруживались. Настоящие результаты подтверждаются несколькими картами спектральных аномалий, обнаруженных в экспериментах 2003 и 2004 гг.) (Gibson et al., manuscripts in preparation, 2005a, 2005b).

Примеры двумерного пространственного спектрального анализа двух участков изображения исследуемой акватории от 2 сентября 2002 г. приведены на рис. 1а (Bondur, Filatov, 2003). На рис. 1б представлен двумерный спектр фонового участка поверхности океана (на расстоянии ~ 5 км западнее диффузора), демонстрирующий поверхностное волнение, не подвергающееся воздействиям глубинного стока. На рис. 1с представлен пространственный спектр фрагмента космического изображения аномального участка акватории в области глубинного стока к югу от диффузора. На спектре этого аномального участка отчетливо видны два достаточно узких («квазикогерентных») спектральных максимума, которые представляют собой поверхностные проявления глубинного стока. Длина волны, соответствующая центру наблюдаемых спектральных гармоник ($\nu_0 \sim 0.01075 \text{ м}^{-1}$), составляет величину $\Lambda \sim 93 \text{ м}$. Увеличенный фрагмент изображения аномального участка приведен на

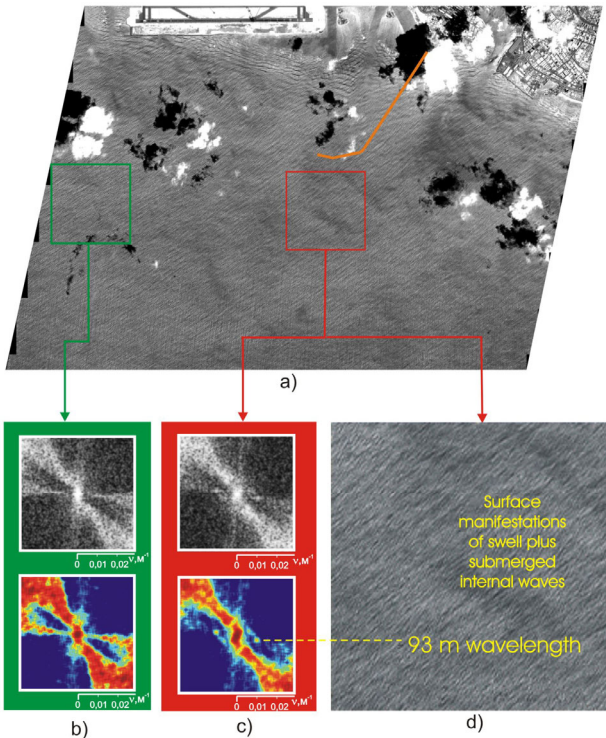


Рис. 1. Фрагмент изображения акватории бухты Мамала (Гонолулу, Гавайи), полученного спутником “Ikonos” 2 сентября 2002 г. с обозначенным положением сбросового устройства с о.Санд (а), фонового участка (b) и участка в зоне глубинного стока (с) [Bondur, 2004, 2001].

рис. 1d. До обработки на рис. 1d на изображении видна лишь рябь северо-восточного направления.

3. Интерпретация данных наблюдений

Подобные эффекты заглубленной турбулентности выявлены В.Г.Бондуrom и подробно описаны, например, в работах [Bondur, 2000; Leung, Gibson, 2004; Gibson et al., manuscripts in preparation 2005a, 2005b]. Узкий диапазон длин волн $30 - 250 \text{ м}$ $\Lambda \approx L_{Lo}$ отражают почти вертикально распространяющиеся волны фоссиллизированной турбулентности (ФТВ) которых определяется частотой источника стратификации (Брента-Вяйсяля)

$$N = \left[- (g / \rho) \partial \rho / \partial z \right]^{1/2}, \text{ и большим масштабом}$$

фоссиллизации Озмидова $L_{Ro} = (\epsilon_0 / N^3)^{1/2}$. Информация об этих солитоновых пакетах излучается на поверхность реактивированными участками заглубленной фоссиллизированной турбулентности (зомби), что приведено в следующем разделе. Обычно принимается, что поверхностные проявления внутренних волн связаны с процессом сглаживания очень коротких поверхностных ветровых волн линейными внутренними волнами с рассеянной низкой горизонтальной поверхностной скоростью под действием пленок поверхностно-активных веществ и поля поверхностного натяжения, но это допущение может быть слишком упрощенным.

Для определения размера поверхностных проявлений глубинного стока анализировались двумерные спектры яркости различных фрагментов изображений для всей исследуемой акватории. Сначала анализировались области размером $2 \times 2 \text{ км}^2$ (рис. 1 b,c,d). Затем анализировались участки размером $1 \times 1 \text{ км}^2$ для более точного определения местоположения всей аномальной области, определения ее формы, а также интенсивности изменений поверхностного волнения [Bondur, 2004]. Результаты обработки показаны на рис. 2а, где были обнаружены два региона или лепестка

аномалии; один распространялся более чем на $12 \times 5 \text{ км}^2$ на юго-запад, а второй – $6 \times 2 \text{ км}^2$ – на юго-восток от диффузора. При проведении измерений с помощью акустического доплеровского профиломера (ADP) были получены трехмерные прогрессивно-векторные диаграммы с заглублением течений вблизи диффузора в юго-западном направлении (рис. 2 б), что соответствует наличию юго-западной области поверхностных аномалий. Течения в районе сбросового устройства отражают течения приливных потоков, направленные с востока на запад, поверхностное течение к берегу (северо-западное направление), и юго-восточные – юго-западные глубинные течения, направленные от берега, от поверхностных береговых стоков. Крупные и мелкие одиночные и двойные лепестки аномалий наблюдались при анализе других космических изображений высокого разрешения, полученных со спутников IKONOS и QuickBird и для других дней комплексных экспериментов (Gibson et al., manuscripts in preparation, 2005a, 2005b).

4. Механическая модель жидкости

Существование обнаружимой из космоса эффектов заглубленной стратифицированной турбулентности на таких чрезмерных расстояниях от диффузора сбросового устройства явилось полной неожиданностью. Каким-либо образом информация о заглубленной турбулентности вблизи диффузора сбросового устройства, должны распространяться на значительные расстояния от источника и достигать поверхности. Детальный анализ физических механизмов, ответственных за формирование подобных явлений сделан в работах [Bondur, 2000, 2004; Leung and Gibson, 2004] (Gibson et al., manuscripts in preparation, 2005a, 2005b). Планируются дальнейшие эксперименты и тестируются различные модели.

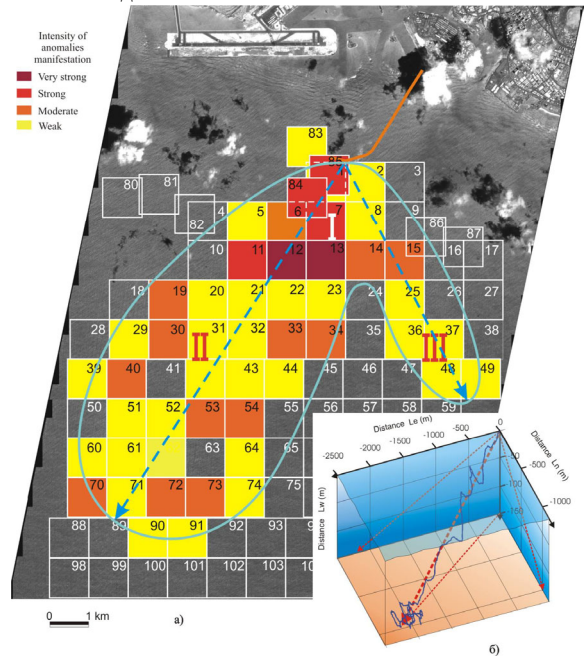


Рис. 2. Пространственное распределение аномальных участков яркости поверхности океана, вызванные глубинным стоком, на 1-км участках космического изображения (а) и прогрессивно-векторная диаграмма (60 м), полученная вблизи диффузора доплеровским измерителем скорости ADP (б).

Турбулентность – это вихреобразное движение жидкости, когда силы внутреннего вихреобразования $(\vec{V} \times \vec{\omega})$ больше, чем любая из прочих сил, стремящихся подавить турбулентность. Турбулентность вращательно и всегда изменяется каскадно от малых масштабов к большим. Фосс

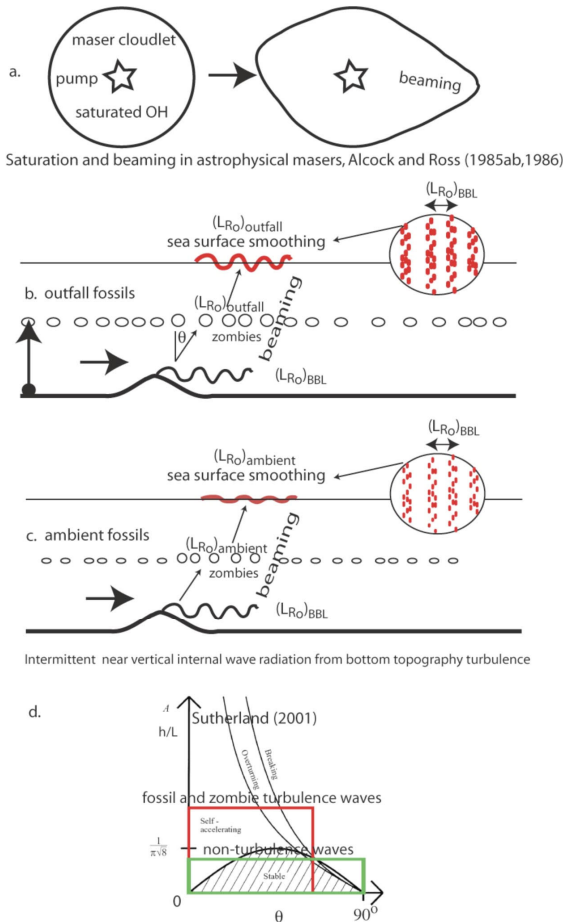


Рис. 3. Модель перемешивания под действием мазера излучаемой турбулентности зомби (Gibson et al., manuscripts in preparation 2005a).

силизированная турбулентность – это возмущение любого гидрофизического поля (ρ, T, S, ω) , вызванное турбулентностью, сохраняющейся после того, как жидкость перестает быть турбулентной на масштабе возмущения [Gibson, 1986, 1989]. К примеру, районы смешанной плотности называются районами фоссилезированно-плотной турбулентности.

Участки фоссилезированно-плотной-турбулентности распространяются от диффузора путем адвекции за счет течений, направленных от берега на глубине всплывания, что продемонстрировали прогрессивные вектора, полученные с ADP (рис. 2б). Это доказано с использованием набора парашютных буюв, развернутых на глубине всплывания струй. Отклоняющиеся характеристики сильных градиентов плотности этих крупных (~ 8 м) частично смешанных участков фоссилезированной турбулентности сброса создают вихреобразование (и турбулентность зомби), из бароклинического вращающего момента на масштабе $(\nabla\rho \times \nabla p) / \rho^2$ (рис. 3). В следствие этого на обнаруживаемых участках извлекается энергия из окружающих внутренних волн (30 – 250 м), что отражают поля уклонов, направления и узкие частотные диапазоны более крупных волн. Фоссилезированные-вихревые-турбулентные движения микроструктурных участков фоссилезированной турбулентности соединяются с вышележащими стратифицированными слоями воды и излучают вторичные почти вертикально (~45°) распространяющиеся, внутренние волны фоссилезированной турбулентности и турбулентности зомби (ФТВ и ЗТВ), которые несут информацию на морскую

поверхность о длинах и направлениях солитоновых внутренних волн, реактивирующих реликты сброса.

Вторичные волны меньшего масштаба (ЗТВ) разрушаются, когда встречаются нагретый поверхностный слой, перемешанный ветром. Результирующая турбулентность и ее реликты локально сглаживают море, сталкиваясь с короткими капиллярными и гравитационно-капиллярными поверхностными волнами. Аномальные участки яркости поверхности океана, отражающие невидимые заглубленные реликты и внутренние волны могут быть обнаружены дистанционно, как показано на рис. 1, 2. Турбулентность, находясь в контакте с устойчиво стратифицированной жидкостью [Sutherland and Linden, 1998; Diamess et al., 2005], создает узкополосный диапазон внутренних волн («волны Линдена-Сазерленда») L_{R0} распространяющихся почти вертикально (~45°), которые, очевидно, эквивалентны фоссилезированным и зомби волнам турбулентности, что показано на рис. 3b,c,d (Gibson et al. manuscripts in preparation 2005a). Усиливающиеся и излучаемые в вертикальном направлении фоссилезированными турбулентными участками при наличии следов ЗТВ, излучаемые турбулентностью рельефа дна внутренние волны могут, таким образом, формировать почти вертикальные лучи, или трубы (Gibson et al. manuscripts in preparation, 2005a), подобные излучаемой радиации астрофизических мазеров [Alcock and Ross, 1985a, 1985b, 1986].

5. Микроструктурные измерения

Значения ϵ для поверхности, измеренные ~ 100 м на северо-запад от диффузора (регион 83 на рис. 2а), были ~ 10^2 больше, чем величины окружающей среды на расстоянии 400 м на восток и 600 м на запад (Gibson et al. manuscripts in preparation, 2005a). Профили и фотографии показали, что турбулентное перемешивание усиливалось, но не передавало вертикально информацию о турбулентности заглубленного стока, определенную с помощью спутника на фрагменте 83. В 2002 г. гидродинамическое состояние более чем 1400 микроструктурных участков было определено с помощью гидродинамических фазовых диаграмм. Большинство из 200 участков активной турбулентности были малы (~ 1 м) и расположены над и под фоссилезированными большими участками, отражающими вертикальное излучение волн фоссилезированной турбулентности, близких к критическим (ФТВ), участками затухающей турбулентности, фоссилезированной вихревой турбулентности, которые вначале колеблются как нераспространяющиеся насыщенные внутренние волны на частоте локальной стратификации N . Все это происходит в короткое время $t \leq N^{-1}$ пока фоссилезируется активная турбулентность. На намного большем примере, полученном в 2003 г., было обнаружено только три участка с $Re_0/Re_f \leq 10^3$.

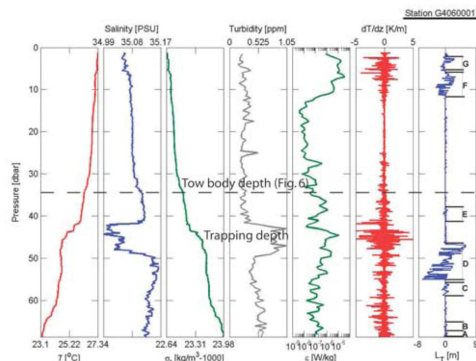


Рис. 4. Вертикальные профили температуры T, солёности S, плотности σ , мутности, коэффициента вязкого рассеяния ϵ , градиентов температуры, смещения плотности L_T 50 м к северо-западу от конца диффузора 2 сентября 2002 г. [Leung and Gibson, 2004].

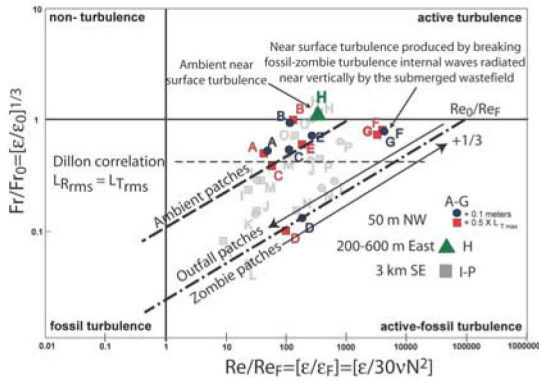


Рис. 5. Гидродинамическая фазовая диаграмма для микроструктурных участков, с выделением точек A-G от конца диффузора (рис. 4). [Leung and Gibson, 2004].

На рис. 4 приведены вертикальные профили значительных микроструктурных изменений, измеряемых в пределах 50 м от конца диффузора, показывающие форму остановленного поля сточных вод на глубине 42-50 м [Leung and Gibson, 2004]. Так как поле сточных вод полностью задерживается стратификацией, мы пришли к выводу, что сильная близповерхностная турбулентность, наблюдаемая на участках F и G, отражает близповерхностные ФТВ и обрушение ЗТВ. Участок E – это участок глубинной активной турбулентности, также вызываемой восходящим излучением ФТВ. Еще одним доказательством обрушения ФТВ над полем сточных вод является сильный температурный градиент фоссилизированной температурной турбулентности непосредственно над участком D (рис. 4).

Гидродинамическое состояние микроструктурных участков определяется с использованием гидродинамических фазовых диаграмм [Gibson, 1986], как показано на рис. 5 для участков из рис. 4. Коэффициент вязкого рассеяния ϵ для исследуемых участков измерения зондами сдвига микроструктурным профиломером. Частота Брента-Вайсяля N оценивается из градиента плотности окружающей среды. По оси y на рис. 4 отложены нормализованные числа Фруда $Fr/Fr_0 = (\epsilon/\epsilon_0)^{1/3}$ - отношения между числами Фруда участков, определенных со скоростью рассеяния ϵ и участками с теми же величинами размера L и стратификации N в начале фоссилизации с коэффициентом рассеяния ϵ_0 , где $\epsilon_0 \approx 3L_{Tmax}^2 N^3$. По оси x на рис 5 отложены нормализованные числа Рейнольдса участка, $Re/Re_F = \epsilon/\epsilon_F$, где $\epsilon_F = 30vN^2$, а v - кинематическая вязкость. Затухание фоссилизации и рост участка зомби должны происходить примерно вдоль оси положения уклонов $+1/3$, как это показано. Участок турбулентности зомби D, определенный как участок активно-фоссилизированной турбулентности на рис. 5, означающий, что энергия наибольших масштабов турбулентности превратилась в фоссилизованно-вихревые турбулентные движения внутренних волн с частотой N , а наименьшие остаются опрокидывающимися активно-турбулентными. Пунктирная линия на рис. 5 показывает корреляцию Диллона $L_R=L_{Tms}$, которая была интерпретирована таким образом, что все микроструктурные участки турбулентны в равновесии с окружающей стратификацией и фоссилизованной турбулентности не существует. Однако, величины L_{Tms} , для участков в активно-фоссилизованном квадранте сохраняют информацию о ϵ_0 , так как $L_{Tms} \sim L_{Tmax} \sim L_{R0}$. На рис. 5 не прослеживается очевидная корреляция между L_R и L_T для отдельных участков, а также какого-либо опровержения парадигмы фоссилизированной турбулентности.

На рис. 6 показаны усредненные области изменения градиента температуры, измеренного при помощи микро-

структурного инструмента на глубине остановки (рис. 4), для обнаружения смешивания, вызванного вторичными, распространяющимися в направлении к морской поверхности. Участок перемешивания на рис. 6 соответствует участку яркости поверхности с направлением юго-запад-юго-восток на рис. 2а. Траектория буя указываем на юго-восточное направление адвекции сточных вод в направлении юго-восточного лепестка. Внутренние волны распространяются от турбулентного потока после фоссилизации на $\sim 45^\circ$ с длиной волны $\Lambda \sim 1.3 L_{R0}$ [Diamessis et al, 2005; рис. 6].

5. Заключение

В заключение скажем, что по спутниковым оптическим изображениям можно было с высоты 680 км обнаружить поверхностные проявления гидродинамических процессов площадью $\sim 70 \text{ км}^2$, вызываемых заглубленной стратифицированной турбулентностью, вызванной полем сточных вод с муниципального сбросового устройства площадью менее 0.1 км^2 . Наблюдаемые явления связаны со сбросом сточных вод с о.Санд (бухта Мамала, Гавайи), возникающими на расстоянии $\sim 2.5 \text{ км}$ от берега на глубине 70 м ниже уровня поверхности океана, и ограниченных стратификацией ниже 40 м. Поверхностные яркостные аномалии были обнаружены на расстояниях $>12 \text{ км}$ от места их возникновения.

Узкий пространственно-частотный характер спектральных аномалий, определенный на рис. 1 и 2 и при других исследованиях (Gibson et al. manuscripts in preparation, 2005a, 2005b), в диапазоне длин волн 30-250 м поддерживают предположение о том, что волны фоссилизированной турбулентности с большой амплитудой излучают рельефом дна прерывисто и почти вертикально турбулентными явлениями, вызванными рельефом дна. Энергия и информация об аномалиях (Λ , θ) этих солитоновых волн излучается на поверхность участками фоссилизированной-зомби турбулентности меньшего размера от сбросового устройства на о. Санд в соответствии с механизмом ВЗТМА (рис. 3а, с, d). По гидродинамическим фазовым диаграммам мы определяем, что реликты от сбросового устройства сохраняются с $Re_0/Re_F \geq 25000$, а реликты среды с $Re_0/Re_F \geq 10^3$. Мы связываем волны фоссилизированной-зомби турбулентности с волнами Линдена-Сазерленда с большой амплитудой (рис. 3 d), изучаемыми в лаборатории и путем нелинейного компьютерного моделирования [Sutherland and Linden, 1998; Diamessis et al., 2005]. Доказательство, подтверждающее эти предположения приведено на рис. 4, 5 и 6, в результатах анализа вертикальных и горизонтальных

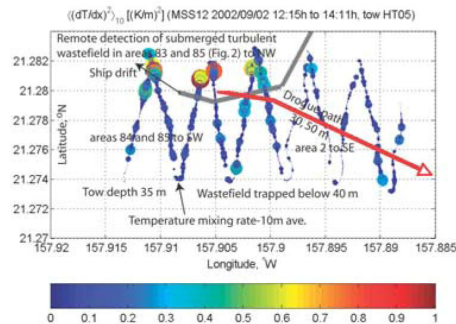


Рис. 6. Цвет и размер кругов показывают изменения градиента температуры, усредненные по 10 м $\sigma(T_x) = \langle (dT/dx)^2 \rangle$ вдоль трассы буксира 2 сентября 2002 г. на глубине $\sim 35 \text{ м}$ над глубиной остановки 40 – 50 м.

микроструктурных измерений. Участки зомби-турбулентности сброса, обнаруженных на гидродинамиче-

ских фазовых диаграммах, и имеющих $Re_0/Re_F \approx 10^5$ объяснялись скоростью и расстояниями $t > 300 N^{-1}$ адвекции буев. На глубинных профилях, полученных в 2004 г., видны

реликты явлений донного пограничного слоя с $Re_0/Re_F \approx 10^6$ (С.Н. Gibson et al., manuscript in preparation, 2005b). Требуется проводить дальнейший анализ и полевые измерения, а также лабораторные эксперименты, компьютерное моделирование и теоретические исследования для проверки нашей интерпретации этих крайне сложных процессов.

Литература

- Bondur V.G. 2004. Aerospace methods applied for modern oceanology (94 p.) In the book "New approaches to oceanology and marine geology" Edited by Lisitsin A.P. М.: Nauka, 648 p. (in Russian).
- Bondur V.G. Problems in aerospace monitoring of the ocean. In "Studies in the areas of oceanology, atmospheric physics, geography, ecology, ocean-related problems, and geocryology" Presentation on Session of Department of Oceanology, Atmospheric Physics, and Geography, Russian Academy of Science in May, 2000. Ed. by Academician Yu.A. Israel, Russian Academy of Science, Moscow, Russia, 254 p., 2001.
- Bondur V.G., Grebeniuk Y.V. 2001. Remote indication of anthropogenic influences on marine environment caused by deepened plumes: modeling, experiments // Study of the Earth from space, 6, pp. 49-67 (Issledovania Zemli iz kosmosa, 6, pp. 49-67, in Russian).
- Bondur V.G., Filatov N.N., 2003. Study of physical processes: coastal zone for detecting anthropogenic impact by means of remote sensing. Proc. of the 7th Workshop on "Physical Processes in Natural Waters", July 2-5, 2003, Russia, Per-tovodsk, pp. 98-103.
- Gibson, C. H. 1999. Fossil turbulence revisited, J. of Marine Systems, 21(1-4), 147-167, <http://xxx.lanl.gov, astro-ph/9904237>.
- Leung, P. T. and Gibson, C. H., Turbulence and fossil turbulence in oceans and lakes, in press. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, <http:// xxx.lanl.gov, astro-ph/0310101>.