

## Энергетика механизма воздействия мазера направленной турбулентности зомби для дистанционного обнаружения заглубленной океанической турбулентности

Карл Гибсон<sup>1</sup>, Валерий Г. Бондур<sup>2</sup>, Р. Норрис Киллер<sup>3</sup>, Рак Тао Леунг<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Departments of Mechanical and Aerospace Engineering and Scripps Institution of Oceanography,  
University of California San Diego, La Jolla CA 92093-0411, USA

<sup>2</sup>Aerocosmos Scientific Center of Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Directed Technologies, Inc., Arlington, VA

<sup>4</sup>Department of Oceanography, Physical Section Texas A&M University,  
College Station, TX 77843, USA

[cgibson@ucsd.edu](mailto:cgibson@ucsd.edu)

### АННОТАЦИЯ

Поверхностные спектральные аномалии были определены со спутника на площади в 200 кв. км, на расстоянии в 20 км от сбросового устройства городских сточных вод в Гонолулу (Bondur 2005, Keeler *et al.* 2005, Gibson *et al.* 2006). Микроструктурные измерения с парашютных зондов и катамаранов показывают коэффициенты вязкой и температурной диссипации над слоем, улавливающим сброс сточных вод. Волны фоссиллизированной (FTWs) и вторичной турбулентности зомби (ZTWs) разрушаются по мере своего почти вертикального распространения, а затем вновь разрушаются около поверхности, выглаживая поверхностную рябь, образуемую ветром, в узко-волновом ( $\lambda$ ) диапазоне от солитонно-подобных внутренних волн, которые снабжают энергией реликты смешивания от сброса и ZTWs. Солитоны с  $\lambda=30-250$  м превращают подобно воздействию мазера нелинейный поток кинетической энергии течений и приливов турбулентности пограничного слоя в волны турбулентности зомби с длинами волн при стратификации. Вторичная (зомби) турбулентность в пределах пятна усиливается в каналах перемешивания и вертикально излучает энергию в виде фоновых внутренних волн в диапазоне  $\lambda$  точно как заряженные метастабильные молекулы вокруг звезд усиливают и излучают квантовую энергию в астрофизическом мазере. Сила всплытия от воздействия установки образует пятна реликтовой турбулентности ниже уровня пикноклина. Механизм воздействия мазера направленной турбулентности зомби (BZTMA) в каналах перемешивания усиливает киловатты этой энергии до мегаватт в процессе диссипации поверхностной турбулентности, производя отражающий эффект на морской поверхности. Механизм вертикального перемешивания BZTMA является необходимым для вертикального перемещения информации, тепла и кинетической энергии в океане, а также для преобразования баротропных течений в бароклинные.

*Ключевые слова:* турбулентность, диффузия, процессы перемешивания, тонкая структура и микроструктура, прибрежные процессы, дистанционное зондирование.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

RASP – это международная программа, позволяющая определить, изучить и произвести измерения с целью дистанционного определения заглубленной и реликтовой турбулентности в океане с помощью оптических и спутниковых снимков ( Bondur and Savin 1995, Bondur and Filatov 2003, Leung and Gibson, 2004, Keeler *et al.* 2005, Wolk *et al.* 2005, Bondur 2005, Keeler, Bondur and Gibson, 2005 (KBG), Gibson *et al.* (2006: GBKL)). Крупнейший на Гавайях (Гонолулу) сброс городских сточных вод с острова Санд предоставляет относительно постоянный источник заглубленной турбулентности, останавливаемый и фоссиллизированный силами всплытия в устойчиво стратифицированных водах в бухте Мамала (Fisher *et al.*, 1997).

Выглаживание поверхности и коэффициенты диссипации и турбулентности, зарегистрированные микроструктурными профилями над диффузором сброса, доказывают, что остановленная турбулентность вызывает почти вертикальное излучение неустойчивых

внутренних волн, производящих обнаруживаемые поверхностные эффекты. Сотни фазовых гидродинамических диаграмм доказывают, что пятна сбросовой реликтовой турбулентности, значительно более энергонасыщены и имеют большие размеры, чем пятна турбулентности от фоновых источников. Обнаружены пятна сбросовой турбулентности в своем полностью активном турбулентном состоянии, подтверждая, что гидродинамическое состояние реликтовой турбулентности более устойчиво.

Пятна реликтовой турбулентности сброса являются местом проявления вторичной турбулентности, вертикально излучающих информацию о фоновых внутренних волнах – солитонах, тем интенсивнее, чем меньше они по размеру.

Значительная часть кинетической энергии стратифицированной турбулентности излучается вертикально при разрушении волн реликтовой турбулентности. Неверно думать, что волны не перемешиваются. Линейные волны не сильно смешиваются, но нелинейные волны реликтовой

турбулентности смешиваются очень активно и производят большие нелинейные внутренние волны, которые смешиваются в процессе турбулентности, и даже еще большие нелинейные внутренние волны, такие как внутренние приливы и солитоны. Узкая ширина полосы частот и большая длина  $\lambda$  внутренних волн-солитонов указывают на такой возможный источник реликтовой турбулентности, как скачкообразная топография дна.

В частности, в ходе настоящего эксперимента установлено, что баротропные приливные волны производят бароклинные внутренние приливы в большей степени за счет приливного турбулентного перемешивания, усиленного действием мазера, и турбулентного торможения в малых масштабах на неровном дне, нежели непосредственно крупномасштабным гидравлическим сопротивлением, обусловленным формой канала (Petrelis *et al.* 2006). Затем внутренние приливы распространяют приливную энергию внутри океанской толщи (Rainville and Pinkel, 2006).

Бароклинные приливные волны были обнаружены за 1700 км от своего источника (Lozovatski *et al.* 2003). Внутренние приливные волны от Атлантического Хребта 3 км глубины, так же, как и сама подводная гора, ясно видны на морской поверхности GBKL (рис. 1в). Приливная сила широко распространяется внутренними приливами и сообщает энергию вторичным событиям турбулентности, которые используют часть энергии на частичное смешивание и излучают остальную вертикально к поверхности, смешиваясь по пути (Gibson 1980, 1986, 1996). Спутниковые измерения показывают, что до 35% от примерно  $10^{15}$  Вт приливной поверхностной энергии рассеивается в океане (Egbert and Ray, 2003).

Процесс проиллюстрирован на рис 1а, это несколько модифицированный рис.2 из работы Rudnick *et al.* 2003, которая описывает Hawaiian Ocean Mixing Experiment (HOMEX) и предварительные результаты исследований Levine and Boyd, 2006 с причала у хребта Киана. Исследователи HOMEX выдвигают гипотезу, что поток баротропной энергии прилива идет напрямую от дна к бароклинному внутреннему приливу и энергия монотонной внутренней волны падает до меньшего масштаба.

В итоге, турбулентность возникает после разрушения самых маленьких внутренних волн (Pinkel and Rudnick, 2006). Факт изменения внутренних волн от больших масштабов к меньшим используется в работе Garrett, 2003 для поддержки тезиса из работы Gregg *et al.*, 2003 о том, что коэффициенты рассеяния турбулентности и перемешивания на экваторе – минимальны, хотя в работах Baker and Gibson, 1987 и Gibson, 1991b показано, что они максимальны. Экваториальные воды – высоко продуктивны биологически, несмотря на максимальную стратификацию из-за солнечного

излучения и дождей, что позволило в работе Gregg *et al.*, 2003 выдвинуть удивляющую гипотезу и в работе Garrett, 2003 заявить о спорном переходе внутренних волн от больших масштабов к меньшим и к турбулентности.

Альтернативная гипотеза, предложенная на рис.1а, что 300м амплитуда колебаний температуры внутреннего прилива над Гавайским хребтом отражает вертикальное смешивание приливных донных температур в процессе полусуточных (12,4ч) событий донной турбулентности, производящих реликтовую турбулентность и излучение волн реликтовой турбулентности (FTW) по Озмидовой шкале фоссиллизации. Эти FTW мелко-масштабные внутренние волны разрушаются и перемешиваются, так как они излучаются почти вертикально, оставляя пятна реликтовой турбулентности, служащие местом для их дальнейшего разрушения. События вторичной турбулентности в пятнах реликтовой турбулентности (зомби) также фоссилизируются и вертикально излучают больше мелко-масштабных вертикальных внутренних волн (ZTWs) в каналах перемешивания. Таким образом, поток приливной энергии идет от горизонтальных, вертикально-однородных приливов прямо к донной турбулентности. Турбулентность порождает мелко-масштабные вертикальные внутренние волны, производящие крупно-масштабные горизонтальные внутренние волны, порождающие турбулентность, производящую мелко-масштабные вертикальные волны и т.д. Этот процесс назван «большим взрывом и непрерывным творением» в работе Gibson, 1987. По этому сценарию турбулентность является причиной внутренних приливов, а не следствием.

Внутренние волны с большой амплитудой наблюдаются там, где приливные течения попадают над рифами, порогами и струями речной воды. Предполагается, что эти волны излучаются напрямую, но они могут также отражать крупно-амплитудные события вертикального перемешивания: турбулентность, реликтовую турбулентность, волны реликтовой турбулентности и механизм ВЗТМА. Рис.1б показывает приливные внутренние волны, образуемые на границе вхождения вод реки Колумбия (Nash and Moum, 2005). Турбулентное перемешивание образуется на границе морской и речной воды, образуемой при встрече входящего прилива и выходящей речной струи. Волны реликтовой турбулентности извлекают энергию из турбулентного сдвига и направляют ее вниз действием мазера, разрушая, перемешивая и углубляя на глубину  $h$  ниже границы. Когда скорость прилива  $u$  становится меньше линейной скорости внутренней волны  $c \approx \sqrt{g\Delta\rho h / \rho}$ , пакет внутренних волн высвобождается и распространяется в сторону от границы.

В ходе экспериментов RASP 2002, 2003 и 2004, парашютные буи сбрасывались на глубину остановки сточных вод, где происходит комплексное смешивание вод пятна турбулентности сброса с фоновыми течениями. Эти 6-10метровые пятна по вертикальной шкале сохраняются на многие дни и важны для дистанционного зондирования турбулентности сброса, скачкообразной донной турбулентности и визуализации дна как такового, GBKL. Для получения данных о состоянии окружающей среды были введены несколько кораблей, буев и установленного на дне оборудования. Синоптическая микроструктурная информация доставлялась вертикальными парашютными буями и горизонтальными сенсорами на катамаране. Для программы RASP 2002 был сделан один панхроматический снимок со спутника, а в 2003 и 2004 годах уже были собраны мультиспектральные и радарные снимки с множества спутников. Для выявления аномалий оптические и радарные спутниковые снимки морской поверхности были подвергнуты спектральному и структурному анализу, (Bondur, 2005), и также определены аномалии на расстоянии в 45 км от сбросового устройства. В данной работе мы фокусируемся на спутниковых и панхроматических оптических данных RASP 2003, сравниваемых с достоверными микроструктурными измерениями и энергетическими связями механики жидкости в физических моделях, объясняющих уникальные и неожиданные результаты.

Результаты эксперимента RASP 2002 приводятся в работах Bondur, (2004, 2005), Bondur and Filatov, (2003), Leung and Gibson, (2004), KBG (2005), GBKL, (2006). Микроструктурные измерения проводились на расстоянии менее 3км, поскольку не предполагалось, что поверхностные аномалии, вызванные вливанием сточных вод, распространятся за площадь поверхности в  $\sim 0,1$  км<sup>2</sup>, захваченной процессами активной и реликтовой турбулентности. Тем не менее, оптические аномалии были обнаружены 2 сентября 2002 года со спутника Ikonos-2 в двух лепестках, покрывающих 70км<sup>2</sup>, отклоняющихся на 10км к ЮЗ и на 7км к ЮВ (Bondur and Filatov, 2003). В ходе эксперимента RASP 2003 оптические снимки от 2,13 и 14 сентября, а также снимки с радаров RADARSAT и ENVISAT от 11 и 13 сентября показали большие и меньшие площади аномалий (Bondur, 2004). Эти микроструктурные данные обсуждаются и сравниваются в настоящей работе, GBKL и KGB. Наиболее близкий по принципу действия к оптической аномалии физический процесс назван механизмом воздействия мазера направленной турбулентности зомби (BZTMA) по аналогии с астрофизическим мазером, усиливающим излучение звезды на частоте мазера в определенных направлениях за счет активизации таких молекул, как OH (молекула воды, потерявшая протон), KBG, GBKL. Уровень

мощности на узкой радиочастоте увеличивается вследствие действия факторов  $>10^6$  подобных мазеров, формирующих районы образования звездных плеяд, определяемых при затемнении пылью на оптической частоте. (Cernicharo *et al.*, 2006)

В RASP спектральные оптические аномалии определяются как узко-частотные элементы ряда Фурье с длинами волн 30-220 м, которые слабо или совсем не проявляются в фоновых показателях морской поверхности. Согласно с BZTMA, внутренние волны, образованные стратифицированной турбулентностью, близки к насыщению при переходе инерционно-вихрево-плавающей турбулентности к реликтовой турбулентности и излучают внутренние волны почти вертикально как волны реликтовой турбулентности (FTWs). Эти волны – узко-частотные, так как производятся реликтовой турбулентностью в узком диапазоне волнового числа, что составляет  $L_{R0}$  по Озмидовой шкале длин в начале фоссилзации, Гибсон, 1980. Для событий донного пограничного слоя по шкале опрокидывания 220м и  $N \sim 5 \times 10^{-3}$ /сек на 350м глубине, коэффициент диссипации в начале фоссилзации  $\epsilon_0 \sim 1,8 \times 10^{-2} \text{ м}^2/\text{сек}^3$  с  $\epsilon_F \sim 7,5 \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{сек}^3$  сравниваются с  $\epsilon_0 \sim 2,4 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{сек}^3$  для 10м опрокидывания в пикноклине с  $N \sim 5 \times 10^{-3}$ /сек и  $\epsilon_F \sim 1,2 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{сек}^3$ . Примеры вычислений дают значения  $Re_0/Re_F$  равные  $2,4 \times 10^6$  и  $2,0 \times 10^4$ , близкие по значению к коэффициентам Рейнолдса, определенных гидродинамическими фазовыми диаграммами для изучаемых микроструктурных участков (см. рис. 16 ниже).

Процессы вертикального перемешивания в океане (и дистанционное зондирование заглобленной турбулентности) преобладают над редкими и мощными событиями, скачкообразными по времени, случайными в пространстве и сложными для примера, (Baker and Gibson, 1987). Океанские микроструктурные исследования, не учитывающие природную нелинейность и крайнюю прерывистость во времени и пространстве стратифицированной турбулентности только усиливают ошибки, которые могут быть как количественными, так и качественными, что показано в результатах работы Gregg *et al.*, 2003.

В данной работе мы обрисовываем BZTMA теорию и энергетику, сравниваемую с моделью излучения прямых внутренних волн, затем обсуждаем теорию образования турбулентности зомби и ее отражение в методе гидродинамической фазовой диаграммы, чтобы оценить гидродинамическое состояние микроструктурного пятна, Gibson, 1980, 1986. Далее следует обзор сравнения вертикальных и горизонтальных микроструктурных исследований со спутниковых данных об определении аномалий, полученных в ходе эксперимента RASP 2003. Анализ результатов представлен с выводами.

## 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЭНЕРГЕТИКА

Турбулентность определяется как вращательное движение жидкости, где инерционно-вихревые силы  $\vec{v} \times \vec{\omega}$  вращения преобладают над любыми другими силами, действующими в воронке, (Gibson, 1999). Так как механизм действия кинетической и транспортной энергии одинаков в любых инерционных системах и зависит от силы  $\vec{v} \times \vec{\omega}$  между воронками, существует физический базис универсального подобия законов турбулентности и турбулентного перемешивания в инерционной зоне, (Gibson, 1991a). Безвихревые течения по определению нетурбулентны, так как завихренность  $\omega$  подобных потоков повсеместно равна нулю. Поток турбулентной энергии всегда нарастает от малых значений к большим, от зарождения к накоплению или излучению. Турбулентность может вызывать обратный поток кинетической энергии (от больших значений к меньшим) в безвихревых течениях, но это нетурбулентный поток, по определению.

Зачастую утверждается, что турбулентные потоки изменяются от больших значений к меньшим, например, (Ferziger, 2005). Подобные утверждения неудачны, неверны, обманчивы и широко распространены. Если установлено, что сила турбулентного потока нарастает, то она тем более нарастает для двумерной турбулентности, как правило, называемой встречным потоком. Исследования доказали, что для трехмерных турбулентных струй, волн, слоев перемешивания и пограничных слоев, турбулентность растет от малых величин к большим. Нелогично называть подобные течения встречным (обратным) потоком.

Ветры и естественные приливы производят турбулентность в верхних и нижних слоях океана и образуют потоки нарастающей кинетической энергии за счет образования горизонтальной турбулентности и течений и почти вертикально распространяющихся внутренних волн. Эти внутренние волны мелкого масштаба несут информацию о заглубленной турбулентности и донной топографии, GBKL.

На рис. 1в представлен механизм физических процессов турбулентности и вертикального перемещения информации в устойчиво стратифицированной жидкости, приводимый в движение воздействием мазера внутренней волны. Рис. 1 в (а) показывает взаимодействие соседних воронок с одним знаком, ведущее к слиянию и усилению турбулентного потока, и с разным знаком с последующим расхождением турбулентных пятен. Рис. 1в (б) отражает развитие донной турбулентности, вертикально излучающей энергию воздействием мазера внутренней волны. Турбулентность, управляемая механизмом вертикального перемещения внутренних волн, названа воздействием мазера по аналогии с квантовым механическим лазером и действием мазера, (Leung and Gibson, 2004), KBG, GBKL. В квантовом механическом лазере энергия

нагнетает молекулы мазера из основного состояния в метаустойчивое. Излучение фотонов в данном энергетическом состоянии стимулирует распад до основного состояния с высвобождением фотонов мазера в поток, усиливающий мощность этой частоты воздействием мазера. Излучение лазеров в твердом состоянии сопровождается тщательно продуманными рефлекторами для создания резонатора, (Koechner, 1999).

Так как волны реликтовой турбулентности нестабильны по всем критериям, разработанным (Sutherland, 2001), они разрушаются, оставляя вертикальный след реликтовых турбулентных пятен. Эти пятна так же, как например, метастабильные молекулы квантового механического мазера, извлекают энергию турбулентности из фоновых движений опрокидывания, фоссилизируясь, излучают энергию вертикально в виде волн вторичной (зомби, зебра) турбулентности. Следы могут стать каналами BZTMA каналами перемешивания, аналогично формированию луча в лазере, рабочей средой которого являются атмосферные облака вокруг небесного тела.

На рис 1 в (б) показано, что донная турбулентность начинается по шкале Колмогорова  $L_K = (v^3/\epsilon)^{1/4}$  после возрастания плотности пограничного слоя до  $5 L_K$ . Инерционные силы вращения  $v \times \omega$  выносят воронки из пограничного слоя. Слияние одинаково направленных воронок усиливает поток энергии турбулентности по шкалам вязкости и мощности. Подобные воронки вызывают инерционные вращательные силы  $v \times \omega$  навстречу друг другу, что служит причиной их слияния, см. рис. 1 в (а). Сдваивание воронок силами  $v \times \omega$  по всем спектрам служит базисом универсальных законов подобия Колмогорова. Соседние воронки с разнонаправленными спинами отталкиваются друг от друга силами инерционного вращения  $v \times \omega$  из зоны турбулентности. Этот процесс вызывает распространение и расширение фоновой нетурбулентной среды.

Силы слияния  $v \times \omega$  одинаково закрученных соседних воронок могут рассматриваться как силы выталкивания, вызванные завихренностью воронок относительно друг друга. Скорость вращения соседних воронок выше, чем противоположных, поэтому, по уравнению Бернулли, давление меньше. Напоминает невесомое вращение мячей для бейсбола, закручивающихся вокруг и навстречу друг другу. Тенденцию к сливанию соседних вращающихся пар часто демонстрировались в лаборатории, (Munier and Leweke, 2003, Driscoll *et al.*, 2002).

Реликтовая турбулентность определяется как колебание любого гидрофизического поля, произведенного турбулентностью, которое сохраняется после того, как жидкость более не турбулентна по шкале возмущения. Когда

воронки стратифицированного пограничного слоя (рис. 1 в(б)) не могут более опрокидываться, преодолевая силы всплывания, их турбулентная кинетическая энергия преобразуется без потерь в энергию насыщенных внутренних волн, называемых вращательными волнами реликтовой турбулентности, которые качаются, не опрокидываясь на частоте фоновой стратификации

$$N=(g\rho^{-1}\delta\rho/\delta z)^{1/2}.$$

Микроструктурные пятна реликтовой турбулентности (кружки пунктиром) имеют вертикальные размеры, пропорциональные фоссиллизации по шкале Озмидова  $L_{Ro}=(\epsilon_0/N^3)^{1/2}$ , и служат местом для событий вторичной турбулентности (зомби или зебра турбулентность), (Gibson, 1987). Волны реликтовой турбулентности выталкиваются инерциальными силами вращения вертикально из пятен реликтовой турбулентности при скорости фоссиллизации пропорциональной скорости сдвига  $v$  для пограничного слоя.

На рис.1 (г) приводится схема эксперимента RASP (сверху) и суть энергетического процесса BZTMA (внизу). Городские сточные воды после обработки на очистительной фабрике острова Санд откачиваются на расстояние 2,4 км от берега 283-мя струями трубами длиной 1040м на глубине 70м. Гидравлическая мощность  $P_H$ , необходимая для закачки этой относительно низко соленой воды к океанскому дну на глубину  $h$ , составляет разницу давлений в морской и пресной водомерных колонках:  $\delta\rho gh$ , умноженная на объемную скорость потока сточных вод  $V_{rate}$ , где  $g$  – сила гравитации. Для проходящего эксперимента  $(\rho_s-\rho_w)$  составляет примерно 23 кг/м<sup>3</sup> и объемная скорость потока – 3-4 м<sup>3</sup>/сек, производимая гидравлическая сила  $P_H=gh(\rho_s-\rho_w) V_{rate} \sim 50\text{кВ}$ .

Исследования около водоотвода показывают усиленную турбулентность в верхнем подветренном 10м слое с коэффициентом вязкой диссипации  $\epsilon \sim 10^{-5}\text{м}^2/\text{сек}^3$  сравниваются фоновые показатели магнитуды на два порядка ниже, (Gibson *et al.*, 2006). Для аномальной зоны эксперимента RASP 2002, предположили, что турбулентность, производимая обрушением волн зомби турбулентности (ZTWs), была причиной наблюдаемой аномалии, и если поверхностная турбулентность от излучения ZTW, были бы с одинаковым  $\epsilon \sim 10^{-5}\text{м}^2/\text{сек}^3$  на 70 км<sup>2</sup> поверхностного слоя на глубине 10м, тогда сила диссипации  $P_D$ , требуемая для дистанционного зондирования, составила бы 7 мегаватт, что на два порядка выше, чем гидравлическая сила  $P_H$  нагнетания сточных вод.

Процесс излучения ZTW – нелинейный и диссипативный, со значительным разрушением и потерей энергии из-за сдвига и стратификации слоев на пути к поверхности, восстанавливающей однородность. Значительная часть нагнетающей силы  $P_H$  направляется вертикально в виде FTWs, оставляя небольшую часть ее для проявления в

виде горизонтальных волн в пикноклине, выглаживающих морскую поверхность, что позволяет с большого расстояния определить зону аномалий. Таким образом, физический механизм дистанционного определения турбулентности сброса в ходе эксперимента RASP покрывает до 800 км<sup>2</sup> и требует энергетических затрат для выглаживания морской поверхности значительно больших, чем нагнетание в устройстве сброса.

Сколько энергии имеется в свободном состоянии, чтобы быть поглощенной фоновыми внутренними волнами и далее отраженной вертикально механизмом зомби турбулентности? Для неровного 10 км<sup>2</sup> турбулентного пограничного слоя области А, произведенным Северным Экваториальным течением со скоростью  $V=0,5\text{м/сек}$ , сила турбулентности пограничного слоя  $P_T$  составит  $\rho C_D V^3 A = 6 \times 10^9 \text{ кг м}^2/\text{сек}^2$  или 6 ГВт, учитывая коэффициент сопротивления  $C_D=1/2$ .

Максимум мощности, излучаемой почти вертикально ( $\sim 45^\circ$ ) в виде волн реликтовой турбулентности этого пятна составит, следовательно,  $\sim 3$  ГВт при коэффициенте полезного действия до 50%, установленном при лабораторных исследованиях (Linden, 1975). Это в  $10^3$  больше, чем наш приблизительный расчет величины  $P_D$  и в  $10^6$  степени больше, чем  $P_H$ . Энергия движений приливов добавляется к этим запасам энергии волн реликтовой турбулентности придонного пограничного слоя, (Munk and Wunsch, 1998). Неровность донного рельефа и неравномерность донных течений уменьшают запас энергии, но картина фоссиллизации поверхностного обрушения сохранит отпечаток FTWs, образуемых в придонном слое, отчетливо проявляя их (волны) на поверхности и выглаживая ее.

Линейные внутренние волны распространяются с направлением и скоростью, определяемой соотношением  $\omega/N$ . В то время как  $\omega/N \rightarrow 1$  направление распространения приближается к вертикали, а скорость распространения стремится к нулю. Воронки в стратифицированном турбулентном слое, вращающиеся на большой скорости, замедляют свое вращение по мере разрастания турбулентного пятна и фоссилизируются по наибольшей шкале опрокидывания  $0,6 L_{Ro}$  на частоте стратификации  $N$ . Вся турбулентная кинетическая энергия преобразуется в насыщенные реликтовые внутренние волны вихревой турбулентности (FVTs), которые создают колебания на частоте  $N$ . Потому энергия в чистом виде не распространяется. Сила вязкости снижает частоту колебаний до такой степени, что колебания совпадают со стратификацией сверху и снизу реликтового турбулентного пятна, и FTWs начинают распространяться почти вертикально в виде волн Линден-Сазерленда большой амплитуды, (KBG 2005, рис.3).

Таким образом, все движения внутренних волн, образованных сбросом, должны были бы излучаться почти вертикально, практически не излучая энергию в горизонтальном направлении. Любая энергия, всплывающая горизонтально, будет удерживаться на глубине пикноклина по крайней мере на 40-50 метров ниже уровня океана и будет оказывать небольшое влияние на выглаживание морской поверхности для дистанционного зондирования подобных непосредственно излучаемых волн, образованных сбросом. Пакеты солитонов, образованные вследствие мощных турбулентных проявлений донного пограничного слоя, будут обладать значительно большей амплитудой и вариативностью направлений, что подтверждают наблюдения спектральных аномалий. Они вступают во взаимодействие с пятнами фоссилезированно-плотной турбулентности, распространяющимися путем адвекции в направлении от берега практически на глубине пикноклина, образуя при этом пятна зомби турбулентности, которые, в свою очередь, создают структуры аномалий, вертикально излучающие ZTWs, согласно механизму BZTMA (см. рис. 1a).

Рис. 2 иллюстрирует процессы реликтовой и зомби турбулентности. В верхнем левом углу схема (1) активного турбулентного пятна в начале фоссилезации с характерным вертикальным контуром по вертикали захвата увеличивающейся разницы плотности в качестве активной турбулентности в сферическом пятне, увеличивающемся по вертикальной шкале. Без поступлений внешней энергии подобные пятна входят в активно-фоссилезированный режим (2), в котором максимум сдвига плотности Торпа и частота фоновой стратификации сохраняют информацию о коэффициенте вязкой диссипации при начале фоссилезации  $\epsilon_0 = 3L^2 T_{MAX} N^3$ , но  $\epsilon < \epsilon_0$ .

Создаваемые колебания излучаются почти вертикально ( $\sim 45^\circ$ ) в виде волн реликтовой турбулентности, показанные как вертикальные стрелки. Полная фоссилезация случается, когда  $\epsilon$  падает до  $\epsilon_F = 30\nu N^2$ , где  $\nu$  - кинематическая вязкость и  $N$  - частота стратификации (Gibson, 1980). При завершённой фоссилезации при  $\epsilon = \epsilon_F$ , силы всплывания, вязкости и инерционно-вращательные силы равны и опрокидывание воронок внутри пятна останавливается. Числа Фруда и Рейнолдса принимают свои критические значения.

Процесс формирования зомби турбулентности от реликтов проиллюстрирован пунктирными стрелками на трех фрагментах (3), (4), (5) рисунка 2. Если пятно фоссилезированно-плотной турбулентности (3) большое, а внутренние фоновые волны маленькие, но больше, чем внутри пятна с большой амплитудой и углом наклона, то градиенты плотности пятна и пограничного слоя могут быть значительно наклонены (3), средняя панель рис.2.

Завихренность, производимая бароклинными закручивающимися парами, пропорциональна векторному произведению градиента плотности и градиента вертикального давления  $\partial\omega/\partial z \approx \nabla\rho_x \nabla p / \rho^2$ .

Турбулентность в опрокидывающихся пограничных слоях пятна увеличивает свой объем (4) и принимает сфероидальную форму (5) рис.2. Траектория меняющегося пятна на графике имеет  $+1/3$  наклон по мере фоссилезации турбулентности и роста турбулентности зомби, как показывает гидродинамическая фазовая диаграмма внизу рис.2. Нормализованное число Фруда для микроструктурного пятна составляет  $Fr/Fr_0 = (\epsilon/\epsilon_0)^{1/3}$ . Нормализованное число Рейнолдса для микроструктурного пятна составляет  $Re/Re_F = \epsilon/\epsilon_F$ , (Gibson, 1986). Энергия пятна экстраполируется от своего предполагаемого значения  $Re_0/Re_F$  в соответствии с  $+1/3$  траекторией.

Любопытный полуэмпирический результат приводится в работе (Gibson *et al.*, 2005), показывающий, что значения  $Re_0/Re_F$  пятен, образуемых на морской поверхности разрушением реликтовых и зомби турбулентных волн, приближается к значениям  $Re_0/Re_F$  при излучении этих видов волн. В работе (Gibson, 1987) описывается механизм происходящих процессов в толще океана. Так,  $\epsilon_0$  на поверхности в соответствии с BZTMA механизмом  $\sim \epsilon_F Re_0/Re_F$ , значит мы можем высчитать энергию, требуемую для поверхностного выглаживания вследствие турбулентности от стратификации среды, глубины перемешивания, а также значения  $Re_0/Re_F$  для доминирующих реликтов, отраженных на графиках гидродинамических фазовых диаграмм для рассматриваемых пятен.

Процесс формирования пятна зомби турбулентности является нелинейным и благоприятствует образованию небольшого сгустка реликтовой турбулентности, имеющего наибольшую площадь для поглощения излучения внутренних волн и растущего быстрее, чем меньшие фоновые пятна. Поэтому пятна зомби турбулентности, излучающие волны зомби турбулентности и дистанционное определение остатков заглубленной турбулентности становятся более редкими и, соответственно, более трудными для определения. К тому же, волны реликтовой турбулентности придонного слоя являются нелинейной функцией скорости и направления придонного слоя, и излучаются в виде скачкообразных пакетов волн. Поскольку волны зомби турбулентности и энергия их порождающая являются нелинейными, волны зомби турбулентности будут излучаться в каналах вертикального перемешивания и могут достигать, а могут и не достигать поверхности, чтобы производить эффект аномальной яркости Фурье. Определение аномалий, таким образом, требует большого числа участков, включающих соответствующее количество каналов

перемешивания ВЗТМА, достигающих морскую поверхность.

На рис.3 можно увидеть спутниковые снимки «плетеных» облаков. Облака выявляют узко-частотные волны реликтовой турбулентности, происходящие из стратифицированного турбулентного слоя морской поверхности. Опровергая поэму Ричардсона, турбулентность возрастает от малых величин до больших до тех пор, пока не закончится энергия или рост ограничится препятствием или воздействием сил, превышающих турбулентные инерционные вращательные силы, (Gibson, 1991a).

Силы всплывания стратифицированного турбулентного пограничного слоя останавливают вертикальный рост по Озмидовой шкале в начале фоссиллизации  $L_{Ro}$ . После фоссиллизации, волны реликтовой турбулентности излучаются почти вертикально на узкой частоте с длинами волн, пропорциональными  $L_{Ro}$ . Эти волны являются ключевым фактором в нашей ВЗТМА модели. Заметим, что наличие «решеток» облаков свидетельствует о довольно непостоянном излучении в пакетах волн реликтовой турбулентности. Полосы и воронки на морской поверхности свидетельствуют о формировании турбулентности во фронтах, производящих излучение волн реликтовой турбулентности к поверхности и дистанционное определение заглубленной турбулентности аналогичное настоящему исследованию. Обширная коллекция лабораторных, атмосферных и цифровых иллюстраций подобных узко-частотных внутренних волн и их проявлений представлена на сайте Брюса Сазерленда (<http://taylor.math.ualberta.ca/~bruce/>).

### 3. СПУТНИКОВЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ И УЧАСТКИ ЯРКОСТНЫХ АНОМАЛИЙ

На рис.4 представлены снимки яркостных аномалий от 2 сентября 2003 года, выполненные российской компанией ИСИНТЕК со спутника Ikonos-2, (Bondur, 2004). Тропический шторм порождает облачность и состояние моря, мешающее микроструктурным измерениям. Фрагмент с самой сильно выраженной аномалией был обнаружен к СЗ от конца диффузора с длинами волн 38 м на ВЗ и 58 м на СЗ, показанный двойными стрелками. Похожий фрагмент (№83) был зафиксирован 2 сентября 2002 года на СЗ от конца диффузора компанией ИСИНТЕК в ходе эксперимента RASP, (GBKL, 2005, рис.3).

Вертикальные профили и дрейф кораблей показали перемещение сточных вод в этом направлении, таким образом, механизм ВЗТМА отражается в исследовании. Источник вертикальных внутренних волн, активизирующий пятна реликтовой турбулентности ( $\sim 6m L_{Tmax}$ ), образует пятно зомби турбулентности с длинами волн 58м к СВ, 38м ВЗ и 75м к С, с направлением, характерным для турбулентных проявлений придонного пограничного слоя.

Более протяженный и количественно отличающийся фрагмент аномалии был обнаружен 13 сентября 2003 года, как представлено на рис.5, (Bondur, 2004). Рассмотрен лепесток в 20км на ЮЗ на снимке от 2 сентября 2003 на рис.4 и от 14 сентября 2003 на рис.6 в сравнении с лепестками 10км на ЮЗ и 7км на ЮВ от 2 сентября, описанными в RASP 2002. Площадь лепестка более 200 км<sup>2</sup> и превышает обозначенную на снимке (см. снимок со спутника ENVISAT на рис.17 внизу слева).

Обнаружена совокупность аномальных узко-частотных компонентов Фурье с длинами волн 90,160 и 200 м со сложным пространственным направлением по неустановленной причине (показана двойными стрелками). Два наиболее ярких фрагмента 2x2км обладают несколько отличными элементами Фурье с длинами волн 100-200 м. Сильные аномалии расположены дальше, чем на 10 км от диффузора, таким образом, пятна реликтовой и зомби турбулентности, существующие на этой дистанции, будут в пределах видимости от пакетов волн реликтовой турбулентности донного слоя, распространяемых в различных направлениях.

Тенденция распространять волны реликтовой турбулентности пакетами является проявлением нелинейной природы турбулентности донного пограничного слоя, и ее сила пропорциональна скорости течения в кубе. Большой размер лепестка аномалии на снимке от 13 сентября связан с сильным перемещением реликтов от сброса о. Санд в результате поступления воды в эстуарий после дождей 10 сентября. На рис.14 пунктиром обозначен фронт перемешивания, определенный с катамарана.

На рис. 6 отражена двух-лепестковая область спектральных аномалий, зафиксированная спутником QuickBird 14 сентября 2003, данные эксперимента RASP 2002, (Bondur, 2004). Фрагменты ярко выраженных аномалий располагаются на 3 и 9 км к ЮЗ и содержат элементы Фурье с длинами волн порядка 100-200 м. Заметное нефтяное пятно наблюдалось со стоящего на якоре корабля. На рис. 8 красные овалы выделяют температурные градиенты, установленные вертикальными микроструктурными профилями в секторе 7,5км южнее диффузора. Это интерпретируется как температурные реликты в прерывистых каналах перемешивания ВЗТМА. Голубыми стрелками вычерчен курс катамарана в том же секторе, см. рис. 15. Красными стрелками обозначен 900м пакет внутренних волн с длинами 100м.

### 4. ВЕРТИКАЛЬНЫЕ МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ПРОФИЛИ

На рис.7 представлен график среднеквадратических показателей коэффициента температурной диссипации по данным 28 вертикальных профилей системы зондов MSS, установленных на корабле НАРА на расстоянии

в 5,5 км южнее диффузора сброса. Зеленым овалом выделен участок с наибольшей температурой смешивания, расцениваемый как остаток реликтовой турбулентности ВЗТМА в каналах перемешивания. Это иллюстрирует прерывистый локальный характер процесса ВЗТМА и предполагает большие значения элементов Фурье для фиксации наличия яркостной аномалии.

Рис. 8 представляет собой карту, отражающую контур среднеквадратических температурных градиентов, замеренных вертикальными профилями вдоль 7,5 км участка южнее диффузора сброса от 14 сентября 2003 года. Красными овалами отмечены два участка с усиленным поверхностным перемешиванием. Они интерпретируются как остатки фоссилизированной турбулентности от каналов перемешивания ВЗТМА, содержащие информацию о длинах внутренних волн, рассматриваемую ИСИНТЕК для выделения яркостных аномалий.

На рис. 9 видны траектории GPS буев в ходе эксперимента RASP 2003. Прибрежные приливные течения переносят реликты турбулентности в направлении с востока на запад от сброса о. Санд, за исключением 11 сентября, когда наблюдался сильный эстуариевый поток, вызванный дождями 10 сентября и ВЗТМА вертикальным перемешиванием.

Рис. 10 демонстрирует вертикальные масштабы опрокидывания Торпа возле диффузора, а также маршрут прохождения придонного профиля на глубине 85 м в километре к востоку. Поверхностные масштабы опрокидывания Торпа обнаруживают разрушение излучаемых почти вертикально волн фоссилизированной и зомби турбулентности вблизи диффузора. Из донного пограничного слоя излучаются волны реликтовой турбулентности с длиной 20 м по Озмидовой шкале фоссилизации. Но такие крупномасштабные вертикальные внутренние волны будут скорее отражаться, чем разрушаться, поэтому не будут производить эффект поверхностного перемешивания. Механизм ВЗТМА работает, так как волны зомби турбулентности меньшего масштаба могут разрушаться в слое ветрового перемешивания и производимые реликты выглаживают поверхностные капиллярные волны в исследуемых участках.

Показания вертикальных профилей опускаемых зондов на участке 5,5 км к югу от диффузора, зарегистрированные 13 сентября 2003 года, приводятся на рис. 11. Профили к востоку от фронта перемешивания регистрируют большие масштабы опрокидывания Торпа, отражающие участок перемешивания рис.17 (низ). Механизм ВЗТМА отсутствует в районе перемешивания, поскольку вертикальная стратификация, необходимая для вертикального перемещения волн зомби турбулентности, слишком слаба. Показатели опрокидывания Торпа на участках,

выделенных зеленым овалом, достигают 10 м значений, значительно превышающих 6 м показатели в области сброса, что наводит на мысль о том, что данные участки поглощают энергию из поля вертикальных фоновых внутренних волн, чтобы преобразоваться в участки турбулентности зомби.

На рис.12 даны показания вертикальных профилей опускаемых зондов на участке 7,5 км к югу от диффузора, зарегистрированные 14 сентября 2003 года. Красными овалами выделены области с максимальным коэффициентом температурной диссипации по шкале опрокидывания Торпа, определяющие ВЗТМА перемешивание с областями зомби турбулентности с масштабами до 8 м. Профиль на востоке показывает только слабые волны зомби, проникающие в хорошо перемешанный слой, захватывающий 60 м, хотя и определяется пятно зомби с 20 м вертикальными масштабами.

##### 5. ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ПРОФИЛИ

Рис. 13 показывает установку MSS оборудования на буксируемую катамараном платформу (CATFISH) участниками эксперимента Хартмутом Прандже и Паком Тао Леунгом. Платформа устраняет вертикальные движения корабля имеющимися ослабленными веревками, протянутыми сверху и снизу по направлению ветра. CATFISH весит 10 кг для облегчения управления на небольших кораблях. 3 мм трос пропускается через блок к депрессору. Веревка из полимеров с высоким молекулярным весом прочнее стальной и служит для минимизации эффекта вибрации на сенсоры. Данные, получаемые сенсорами, передаются в лабораторию корабля для записи через свободно прикрепленный к 6 мм канату кабель. Использовались ускорения до 3 м /сек, но в будущих экспериментах для более подробных характеристик процессов вертикального перемешивания, позволяющих дистанционно обнаружить заглубленную турбулентность, могут понадобиться большие скорости и более сложные платформы. Анализ и трактовка данных, полученных с горизонтальных профилей, находятся в начальной стадии обработки.

Рис.14 отражает определение буксиром температуры, плотности и сигнала градиента температуры фронта перемешивания к востоку от большого лепестка аномалии от 13 сентября 2003 года, см. рис.5 и 7. Оборудование устанавливалось на 12 м глубине, буксир двигался со скоростью 2 м/сек, на расстоянии 5,5 км южнее от диффузора. К западу от фронта перемешивания в лепестке аномалии существует достаточно устойчивая стратификация, обеспечивающая передачу информации о существовании пятен заглубленной реликтовой турбулентности сброса. Флуктуации и градиенты температур и плотности незначительны. К востоку от фронта перемешивания флуктуации и градиенты



температур и плотности резко возрастают, отражая крупномасштабные волны опрокидывания на рис.11, вызванные ВЗТМА эстуариевым перемешиванием 11 сентября, рис.17.

Рис.15 показывает 900м пакет 100-метровых внутренних волн на западной точке участка максимума среднеквадратического градиента температур от 14 сентября 2003 года, который находится в 7,5км южнее диффузора и отмечен западным красным овалом на рис.8 и рис.11. Пакет совпадает со средней интенсивностью аномальной яркости Фурье фрагмента 47 на рис.6.

#### 6. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ФАЗОВЫЕ ДИАГРАММЫ

Рис.16 отражает все микроструктурные элементы гидродинамической фазовой диаграммы (ГФД), вычисленные в ходе экспериментов RASP 2002 и 2003. Активных турбулентных пятен с  $Re_o/Re_F \approx 25000$  в ходе эксперимента RASP2002 (наверху) не обнаружено, как ожидалось в результате экстраполяции линии +1/3 наклона. Таким образом, турбулентность сброса имеет недостаточную выборку. На основании результатов изучения 3518 пятен турбулентности в ходе эксперимента RASP 2003 сделано заключение, что соотношение  $Re_o/Re_F$  для сброса о. Санд в 2003 году составило 25000, экстраполированное для трех обнаруженных пятен активной турбулентности, обозначенные кругами на графике ГФД внизу. Сравнивая эти выводы с изученными 2130 микроструктурными пятнами в ходе эксперимента RASP 2002, где не нашлось пятен с активной турбулентностью с  $Re_o/Re_F > 8000$ , делается заключение, что выборка была не достаточной. Использовался ГФД метод (Gibson, 1986, Leung and Gibson, 2004). Пятна с активной турбулентностью должны обладать сверхкритическими числами Фруда и Рейнолдса. На рис.16,  $Fr/ Fr_o = (\varepsilon/\varepsilon_o)^{1/3}$  для каждого пятна вычисляется от измеренного значения  $\varepsilon$ , нормализованного значением  $\varepsilon_o$  в начале фоссиллизации, где  $\varepsilon_o = 3L_{Tmax}^2 N^3$ . Число Рейнолдса составляет соотношение  $\varepsilon/\varepsilon_F$ , которое вычисляется в зависимости от коэффициента рассеяния при полной фоссиллизации  $\varepsilon_F = 30vN^2$ . Микроструктурные участки идентифицировались методом перехода через нуль (Prandke and Stips, 1992, Gregg, 1980), при котором требуется между вертикально разделенными участками температурный градиент, отличный от нуля и расстояние  $> 20$ см.

Коллекция из 5521 микроструктурных элементов ГФД, представленных на рис.16, достаточно обширная, чтобы делать различные заключения о турбулентности в стратифицированном океане. Очевидно, что не наблюдается совпадения с корреляцией (Dillon, 1982,1984), где турбулентность образуется непрерывно с  $\varepsilon$  пропорциональным  $\varepsilon_o$  и без реликтовой турбулентности. Оба вывода Диллона неверны. Достаточное количество участков активной

реликтовой турбулентности были выбраны, в том числе и участки первичной активной турбулентности сброса, с большими значениями  $Re_o/Re_F$ . В левом нижнем квадранте были обнаружены немного участков с полностью реликтовой турбулентностью, иллюстрирующие процесс турбулентности зомби, при котором участки реликтовой турбулентности извлекают энергию из фоновых движений жидкости.

Группа участков, обозначенных на рис.16 на графике ГФД, являются участками турбулентности зомби и экстраполируются по оси +1/3 наклона со значениями  $Re_o/Re_F \sim 100000$ . Нет никаких оснований предполагать, что при таких мощных событиях отсутствуют реликты турбулентности. Напротив, эти точки представляют участки фоссиллированной-плотной турбулентности, извлекающие гравитационную потенциальную энергию среды из внутренних волн и других движений, порождающую турбулентность зомби. Это увеличивает значение их  $\varepsilon_o$  с увеличением масштабов вертикального опрокидывания  $L_{Tmax}$ , и как результат увеличивает значения  $Re_o/Re_F$ . Значительно больше пятен турбулентности зомби обнаружено в местах аномалий яркости Фурье на рис.4-6, чем в фоновых районах, как представлено на следующем рис. 18. Для данного значения  $Re_o/Re_F$  на ГФД обнаружено больше участков с активно-фоссиллированной турбулентностью, чем участков с активной турбулентностью. При возрастании  $Re_o/Re_F$  процент активных участков убывает. Это отражает тенденцию увеличения прерывистости с возрастанием числа Рейнолдса для турбулентности (3 закон подобия Колмогорова) и трудность соответствующей микроструктурной выборки в толще океана, где, как правило, доминируют очень немногие мощные события турбулентности над целым рядом процессов перемешивания и рассеяния. В ходе эксперимента НОМЕ оценки средних вертикальных коэффициентов диффузии и диссипации рассчитывались без учета реликтовой турбулентности и донных событий (Alford *et al.*, 2006, Klymak *et al.*, 2006, Lee *et al.*, 2006). Не представлены ни гидродинамические фазовые диаграммы, ни перемежающиеся параметры. Подобные оценки могут быть завышены, но скорее занижены.

#### 7. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 17 представлены снимки со спутников RADARSAT и ENVISAT от 11 сентября 2003 (а, сверху) и от 13 сентября 2003 (а, снизу) исследованными различными методами анализа яркостных аномалий, разработанными компанией ИСИНТЕК, (Bondur, 2004). Для достижения контрастности радарные снимки обработаны методами, включающими фильтрацию помех в виде спеклов медианными фильтрами и коррекцией Гаусса. Небольшие изменения в выглаживании поверхности

капиллярными волнами могут отражаться на гистограммах брэгговского резонанса яркости. Эти данные сравниваются с действительными микроструктурными показателями температур и коэффициентов вязкой диссипации для указанных участков в эти же дни.

Коэффициенты температурной (б, сверху) и вязкой (б, снизу) диссипации представлены по показаниям заглубленных зондов. Определенные радаром аномалии интерпретируются как вызываемые выравниванием BZTMA каналом перемешивания вследствие реликтов сброса о. Санд, распространяемых путем адвекции вдоль берега приливными движениями и от берега эстуариевым перемешиванием вклинивающейся соленой воды. Сильное BZTMA вертикальное перемешивание в бухте Мамала пятнами фоссилизированной турбулентности сброса о. Санд было вызвано дождями над о. Оаху 10 сентября, производящими увеличенные эстуариевые потоки и район перемешивания вверх рис.17, исключая возможность дистанционного определения заглубленной турбулентности от сброса 11 сентября 2003 года. 11 сентября волны турбулентности зомби в зоне перемешивания к югу от сброса были настолько ослабленными, что не могли выравнивать морскую поверхность и быть определены, но были вполне результативными в красном участке с севера на юг (слева сверху рис.17) эстуариевого перемешивания протяженностью почти 40км к ЮЮВ. Прибрежное BZTMA перемешивание, вызванное пятнами фоссилизированной турбулентности о.Санд, распространяет свое влияние на 30км к В.

К 13 сентября 2003 года расположение участков перемешивания и уже смешанных участков поменялись местами в направлении с запада на восток (рис.17 снизу), образуя большой лепесток яркостной аномалии, наблюдаемой на снимке Ikonos-2, см. рис.5,7,14 и рис.17(внизу).

Рис.18 отражает картину расположения точек ГФД по данным эксперимента RASP 2003 в зависимости от того, попадало или нет то или иное пятно в зону яркостной аномалии, (Wolk *et al.*, 2004). Рис.18а включает сам диффузор, чтобы определить первоначальные пятна активной и реликтовой турбулентности, обозначенные треугольниками. Они находятся на линии +1/3 наклона и определяют число Рейнолдса в начале фоссилизации с  $Re_o/Re_F = 25000$ , сравниваемые с  $Re_o/Re_F=300$  для участков среды на рис. 18в.

Несмотря на то, что было проанализировано 3518 пятен, процесс турбулентности сброса имеет недостаточную выборку, с только тремя участками полной турбулентности в квадранте ГФД. Не обнаружено активных зон с  $Re_o/Re_F$ , превышающим 25000. Таким образом, участки с большим экстраполированным значением  $Re_o/Re_F$  интерпретируются как пятна зомби турбулентности, образованные из пятен реликтовой турбулентности сброса действием механизма BZTMA. Несколько пятен

турбулентности зомби были обнаружены на фоновом изображении рис.18в. Они оказываются слабыми с недостаточным воздействием движений вертикальных внутренних волн среды для образования BZTMA каналов перемешивания.

Среднеарифметическое значение коэффициента диссипации для участков на рис.18а составило  $8,1 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{сек}^3$ , больше на статистически существенное значение в 5 раз (с вероятностью 95%), чем для фоновых зон рис.18 б и в, (Wolk *et al.*, 2004). Данный коэффициент вязкой диссипации дает 5 КВ энергии на протяженности  $6 \times 10^6 \text{ м}^3$  от диффузора. Но при распространении более чем  $10^3$  объемов на площади более чем  $100 \text{ км}^2$  определенных ИСИНТЕКом яркостных аномалий требуется мощность более 5 мегаватт. Это отражает существенный прирост силы турбулентности в результате действия BZTMA, при котором пятна реликтовой турбулентности извлекают большое количество энергии внутренних волн среды и излучают информацию в виде зомби на морскую поверхность о заглубленной реликтовой турбулентности сброса и реликтовой турбулентности по шкале Озмидова  $L_{Ro}$  донного пограничного слоя внутренних вертикальных волн, активизирующих зомби.

## 8. ВЫВОДЫ

Микроструктурные исследования в ходе эксперимента RASP 2003 подтверждают и расширяют возможности русских коллег дистанционно определять реликты заглубленной турбулентности, что продемонстрировано работами RASP 2002, (Bondur and Filatov, 2003), KBG, GBKL. Механизм воздействия мазера направленной турбулентности зомби (BZTMA), рис.1 г, остается наиболее жизнеспособной рабочей гипотезой для описания физических процессов, дистанционно определяемых с помощью оптической и радарной аппаратуры, GBKL.

Изучение энергетики процесса поддерживает BZTMA модель, при которой пятна фоссилизированно-плотной турбулентности, переносимые от сбросового устройства, извлекают энергию из пакетов узко-частотных внутренних волн донного пограничного слоя и излучают информацию на морскую поверхность волнами меньшего масштаба, которые могут взаимодействовать с ветровым выравниванием, преобразуясь в более масштабный процесс, определяемый как яркостная аномалия Фурье.

Из-за влияния Гавайского хребта BZTMA перемешивание может усилить внутренние приливные волны, рис. 1а, а также солитоны от речных фронтов волн, рис.1 б. Значительная часть кинетической энергии при фоссилизации излучается почти вертикально в виде FTWs и ZTWs

На рис. 1 в отражен основной каскадный механизм турбулентности, приводимый в движение инерционными силами вращения  $\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}$

от малых до больших шкал, а также процесс вертикального перемешивания стратифицированной турбулентности под действием мазера реликтовой турбулентности. Все экспериментальные данные показывают, что океанографические исследования теплоты, массы, кинетической энергии и энергетики обусловлены этими фундаментальными процессами активной и реликтовой турбулентности по всем масштабам и на каждой стадии.

Океанографические ресурсы сохраняющихся величин не придут в равновесие, если допустить, что каскад внутренних волн меняется от больших масштабов к меньшим, и если реликтовая турбулентность не существует или незначительна в сравнении с центральной динамической компонентой вертикального процесса перемещения в океане.

Микроструктурные измерения с заглубленных зондов и катамаранов подтвердили наличие BZTMA процесса в мощном механизме вертикального перемешивания. Нелинейность строения зомби турбулентности, при которой наибольшие пятна зомби турбулентности обладают наибольшей площадью поперечного сечения для извлечения энергии турбулентности из внутренних волн среды, является причиной процесса в малых вертикальных участках, называемых BZTMA каналами перемешивания.

Эти каналы перемешивания, инициированные реликтами сбросового устройства о.Санд, доминируют в процессах вертикального и горизонтального перемешивания в бухте Мамала. Эстуариевое перемешивание – это производимое BZTMA вертикальное кинетическое перемещение, при котором объем потока пресной воды, текущей от острова увеличивается вследствие вертикального перемешивания с морской водой.

Результирующие глубинные прибрежные потоки переносят пятна реликтовой турбулентности от глубины остановки сточных вод и производят наблюдаемые ЮЗ и ЮВ лепестки яркостных аномалий при средних осадках и крупный ЮЗ лепесток яркостной аномалии от 13 сентября 2003 года после сильных осадков 10 сентября.

Около шести тысяч точек ГФД были собраны в ходе экспериментов RASP 2002 и 2003. Это весомое подтверждение парадигмы реликтовой турбулентности для стратифицированной турбулентности, при которой пятна активной турбулентности каскадно преобразуются от малых к большим масштабам пока максимум по шкале опрокидывания Торпа  $L_{Tmax}$  составляет  $\sim 0,6$  от  $L_{Ro}=(\epsilon_o/N^3)^{1/2}$  по шкале Озмидова при фоссиллизации и частота стратификации  $N$ , вычисляемая при разнице плотности по вертикали несколько больше, чем  $L_{Tmax}$ .

Нормализованное число Рейнолдса для полностью активных пятен турбулентности сброса составляет  $Re_o/Re_F = \epsilon_o/\epsilon_F = 25000$ , коэффициент рассеяния при полной фоссиллизации  $\epsilon_F = 30vN^2$  и  $v$ -кинематическая

вязкость. Участки, экстраполируемые к большим значениям  $Re_o/Re_F$ , интерпретируются как участки турбулентности зомби. Недостаток обследованных пятен в полностью фоссиллизованном квадранте свидетельствует о том, что процесс вертикального перемешивания турбулентности зомби и рассеяния характерен для стратифицированного турбулентного перемешивания и рассеяния в океане.

Поскольку были обнаружены только несколько пятен с  $Re/Re_F = \epsilon/\epsilon_F \geq 25000$ , делается вывод, что эти пятна полностью активной турбулентности сброса сохраняются меньше время по сравнению с пятнами в активно-фоссиллизованном состоянии и быстро достигают квадранта ГФД активной фоссиллизации в то время, как  $\epsilon$  уменьшается, а шкала опрокидывания нет. На основании большой обследуемой территории и измеренных скоростей адвекции пятна реликтовой турбулентности и их зомби существуют в течение времени, превышающем  $1000N^{-1}$ .

Средние значения коэффициентов вязкой диссипации в аномальных районах значительно выше аналогичных показателей среды, (Wolk *et al.*, 2004), показывая значительное увеличение киловатт закачиваемой энергии от сбросового устройства до мегаватт в результате действия BZTMA механизма, расходуя гигаватты энергии от волн реликтовой турбулентности донного слоя и других возможных источников энергии внутренних волн среды.

Эти предположения нуждаются в дальнейшем подтверждении и уточнении. Остаются важные геометрические вопросы о каналах перемешивания BZTMA. Они представляют собой каналы или пласты? Какую часть горизонтальной морской поверхности занимают каналы в качестве функции глубины? Зависят ли они от времени и условий среды океана? Процессы рассеяния и океанографического и лимнологического перемешивания могут быть значительно нарушены вследствие BZTMA механизма.

## БЛАГОДАРНОСТИ

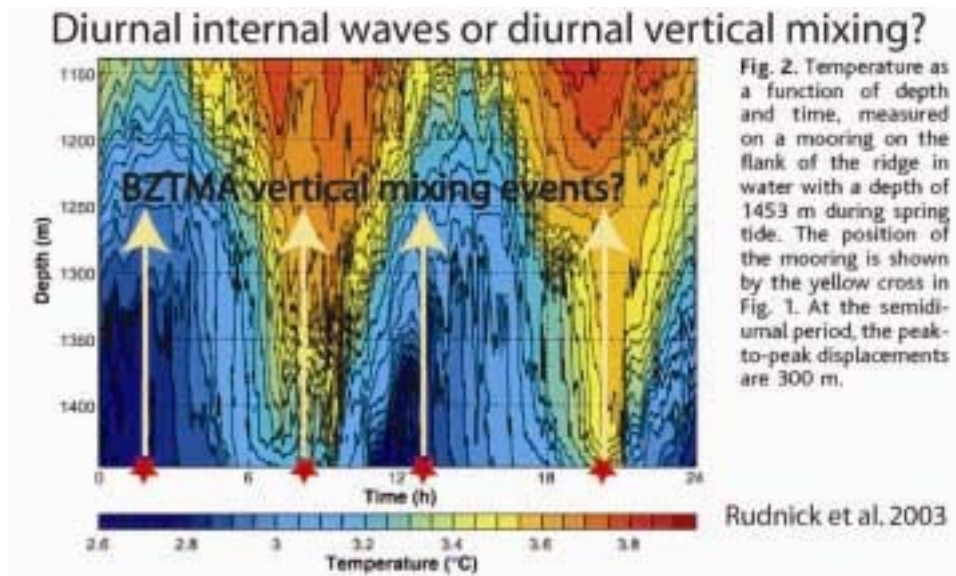
Fabian Wolk and Pak Tao Leung of Rockland Oceanographic Services Inc. и Hartmut Prandke of ISW Wassermesstechnik снабдили MSS оборудованием, помогли спланировать и выполнить измерения, внесли огромный вклад в подтверждение, анализ и интерпретацию данных. Финансовая поддержка была оказана Directed Technologies, Inc.

## ЛІТЕРАТУРА

- Alford, M.H., Gregg, M.C. & Merrifield, M.A. 2006. Structure, propagation, and mixing of energetic baroclinic tides in Mamala Bay, Oahu, Hawaii, *J.Phys. Oceanogr.*, 36, 997-1018.
- Baker, M. A. and C. H. Gibson 1987. Sampling Turbulence in the Stratified Ocean: Statistical Consequences of Strong Intermittency, *J. of Phys. Oceanogr.*, 17: 10, 1817-1837.
- Bondur V.G., Savin A.I. 1995. Principle of modeling of signal fields at input into remote sensing equipment of aerospace environment monitoring systems, *Research of the Earth From Space*, 4, 24-33.
- 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, 2 - 5 July, 2003, Russia, Petrozavodsk, 98-103.
- Bondur, V. G., Ed., 2004. ISINTECH Preliminary Report, Remote Monitoring of the Anthropogenic Influence on Ecosystems in Littoral Waters (RASP), Phase III Remote sensing of Anthropogenic Influence caused by submerged sewers on ecosystems of Littoral Waters using optical and radiophysical space methods, January, 1-290.
- Bondur, V. G. 2005. Presentation at RASP 2005 UCSD workshop, Mar. 9-11.
- Cernicharo, J., Pardo, J.R., and Weiss, A. 2006. A new water vapor megamaser, *The Astrophysical Journal*, 646:L49-L52.
- Dillon, T. R. 1982. Vertical overturns: A comparison of Thorpe and Ozmidov scales. *J. Geophys. Res.*, 87, 9601-9613.
- Dillon, T. R. 1984. The energetics of overturning structures: Implications for the theory of fossil turbulence, *J. Phys. Oceanogr.*, 14, 541-549.
- Driscoll, C. F., D. Z. Jin, D. A. Schecter, D. H. E. Dubin 2002. Vortex dynamics in 2D electron plasmas, *Physica C*, 369, 588.
- Egbert, G. D. and R. D. Ray 2003. Semi-diurnal and diurnal tidal dissipation from TOPEX/Poseidon altimetry, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 17, 1907, doi:10.1029/2003GL017676.
- Fisher H.B., List E.J., Koh R.C.Y., Imberger J., Brooks. N.H. 1997. Mixing in inland and coastal waters. Academic Press Inc., 483 p.
- Garrett, C. 2003. Mixing with latitude, *Nature*, 422,477-478.
- Gibson, C. H. 1980. Fossil temperature, salinity, and vorticity turbulence in the ocean, in *Marine Turbulence*, J. Nihoul (Ed.), Elsevier Publishing Co., Amsterdam, 221-257.
- Gibson, C. H. 1986. Internal waves, fossil turbulence, and composite ocean microstructure spectra, *J. Fluid Mech.* 168, 89-117.
- Gibson, C. H. 1987. Oceanic turbulence: big bangs and continuous creation, *PhysicoChemical Hydrodynamics*, 8, 1-22.
- Gibson, C. H. 1991a. Kolmogorov similarity hypotheses for scalar fields: sampling Intermittent turbulent mixing in the ocean and galaxy, in *Turbulence and stochastic processes: Kolmogorov's ideas 50 years on*, Proceedings of the Royal Society London, Ser. A, 434, 1890, 149-164; <http://xxx.lanl.gov>, astro-ph/9904269.
- Gibson, C.H. 1991b. Turbulence, mixing, and heat flux in the ocean main thermocline, *J. Geophys. Res.*, 96(C7), 20,403-20,420.
- Gibson, C. H., V. G. Bondur, R. N. Keeler and P. T. Leung 2006. Remote sensing of submerged oceanic turbulence and fossil turbulence, *J. Appl. Fluid Mech.*, in press: GBKL.
- Gregg, M. C. 1980. Zero crossings of temperature microstructure. In: *Marine turbulence*, J. C. J. Nihoul, Jr, editor, Elsevier, New York, pp. 135-142.
- Gregg, M.C., Sanford, T.B., & Winkel, D.P. 2003. Reduced mixing of the breaking of internal waves in equatorial waters, *Nature*, 422, 513-515.
- 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: KBG.
- Keeler, R. N., V. G. Bondur, D. Vithanage 2004. Comprehensive sea truth measurements carried out on Oahu Island to support satellite imagery of the ocean, *Sea Technology* 47 (April), 53-58,
- Klymak, J. *et al* 2006. An estimate of tidal energy lost to turbulence at the Hawaiian Ridge, *J. Phys. Oceanogr.*, 36, 1165-1181
- Koehnner, W. 1999. Solid-State Laser Engineering, Fifth Revised and Updated Edition, Springer, NY.

- Lee, C.M. *et al.* 2006. Internal tides and turbulence along the 3000-m isobath of the Hawaiian Ridge, *J. Phys. Oceanogr.*, 36, 1165-1181.
- Leung, P. T. and Gibson, C. H., Turbulence and fossil turbulence in oceans and lakes, 2004, *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 22(1), 1-23. [http:// xxx.lanl.gov](http://xxx.lanl.gov), astro-ph/0310101.
- Levine, M. D. and Boyd, T. J. 2006. Tidally-forced internal waves and overturns observed on a slope: Results from HOME, *J. Phys. Oceanogr.*, in press.
- Lozovatski, I., Morozov, E., & Fernando, H. 2003. Spatial decay of energy density of tidal internal waves, *J. Geophys. Res.*, 108, 3201, doi: 10.1029/2001Jc001169
- Linden, P. F. 1975. The deepening of a mixed layer in a stratified fluid, *J. Fluid Mech.* 71, 385-405.
- Munier, P., and T. Leweke 2003. Analysis and treatment of errors due to high velocity gradients in particle image velocimetry, *Experiments in Fluids* 35, 408–421.
- Munk, W. and C. Wunsch 1998. Abyssal Recipes II: Energetics of tidal and wind mixing *Deep-Sea Res.*, 45, 1977-2010.
- Nash, J. D and J.N. Moum, 2005. River plumes as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean, *Nature* 437, 400-403.
- Prandke, H. and A. Stips 1992. A model of Baltic thermocline turbulence patches, deduced from experimental investigations, *Continental Shelf Research*, Vol. 12, No. 5/6, pp. 643-659.
- Pinkel, R. & Rudnick, D. 2006. Editorial, *J. Phys. Oceanolog.*, 36, 965-966.
- Rainville, L. & Pinkel, R. 2006. Propagation of low mode internal waves through the ocean, *J. Phys. Oceanog.*, 36, 1220-1236/
- Rudnick, D. L., T. J. Boyd, R. E. Brainard, G. S. Carter, G. D. Egbert, M. C. Gregg, P. E. Holloway, J. M. Klymak, E. Kunze, C. M. Lee, M. D. Levine, D. S. Luther, J. P. Martin, M. A. Merrifield, J. N. Moum, J. D. Nash, R. Pinkel, L. Rainville, T. B. Sanford, 2003: From tides to mixing along the Hawaiian Ridge, *Science*, 301(8), 355-357.
- Sutherland, B. R. 2001. Finite-amplitude internal wavepacket dispersion and breaking, *J. Fluid Mech.* 429, 343-380.
- Wolk, F., H. Prandke and C. H. Gibson 2005. Turbulence measurements support satellite observations, *Sea Technology*,
- Wolk, F., H. Prandke and P. Leung 2004. RASP 2002/2003 Data Analysis, Preliminary Results and Measurement Plan. 1-13.

## Рисунки



**Рис.1а.** Каков механизм превращения энергии суточных баротропных приливов в 300м бароклинные внутренние волны в районе Гавайского хребта? В работе Rudnick et al. 2003 допускается, что на уклоне энергия каскадно переходит из баротропной в бароклинную, а возрастание турбулентности и коэффициентов температурной диссипации зависит от внутренних приливов. Альтернативные гипотезы утверждают, что вертикальные температурные вариации в  $0,7^{\circ}\text{C}$ , связанные с наличием BZTMA перемешивания вследствие донной топографии и суточных приливов. При затухании баротропных приливов участки перемешивания распространяются от хребта со скоростью внутреннего прилива  $C \approx \sqrt{g\rho' \cdot h}$ , где  $\rho' = \Delta\rho / \rho$  и  $h$  – усиленные значения. Увеличение коэффициентов диссипации наблюдается в связи с разрушением FTWs и ZTWs, сопровождающим действие BZTMA механизма, а не разрушением внутреннего прилива.

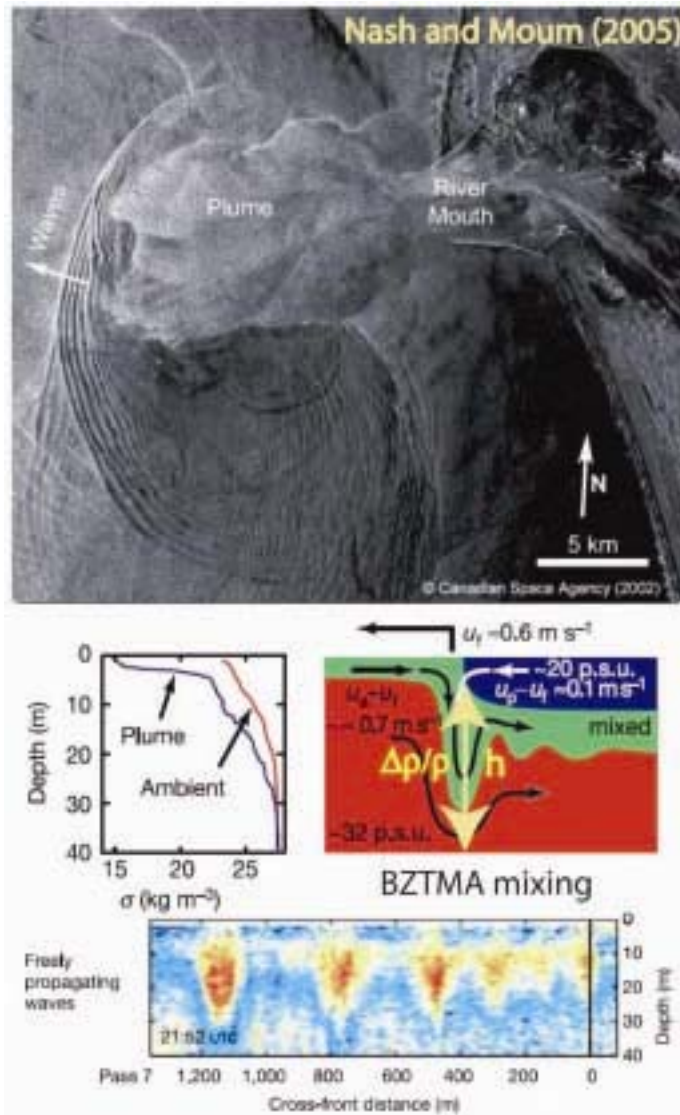
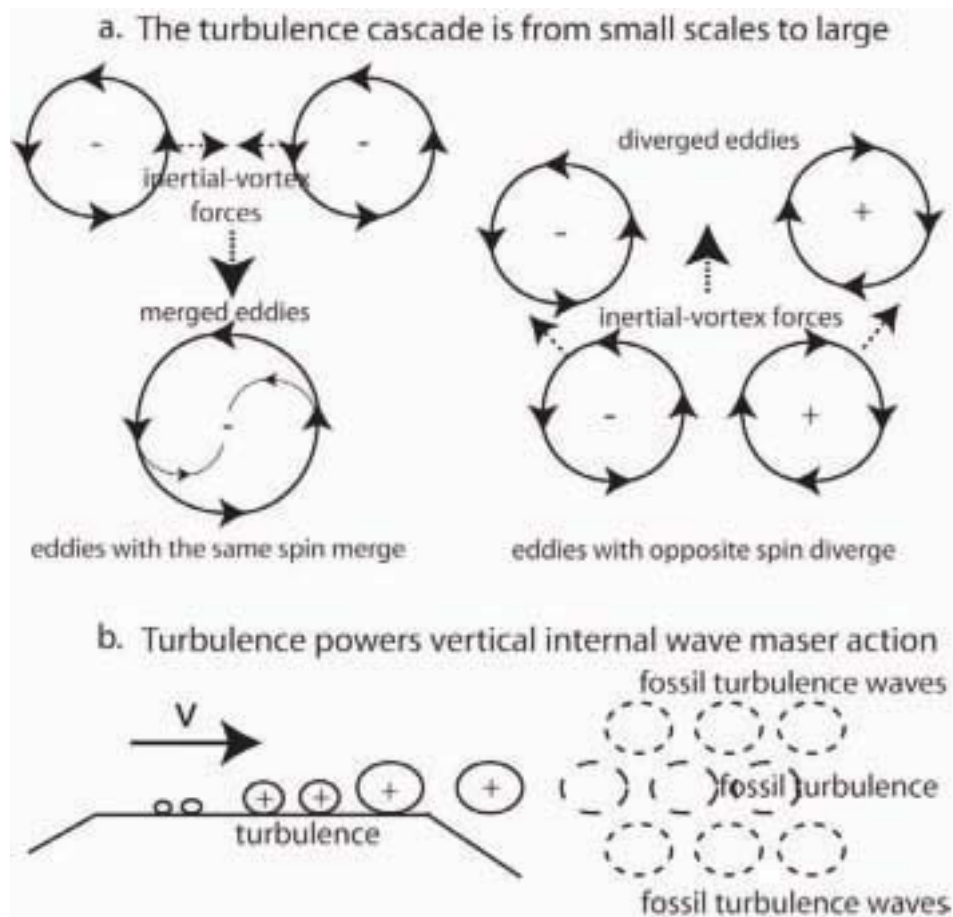


Рис.16. Процесс образования внутренних приливных волн на границе всплывания вод реки Колумбия, Nash and Moum (2005). Амплитуда и скорость волн  $C \approx \sqrt{g\rho' h}$  зависит от разницы плотностей  $\rho' = \Delta\rho/\rho$  и глубиной проникновения  $h$  зоны перемешивания BZTMA. Под действием солитонов образуется турбулентность, порождающая мелкомасштабные FTWs, транслируемые на поверхность и определяемые с помощью радарных снимков.



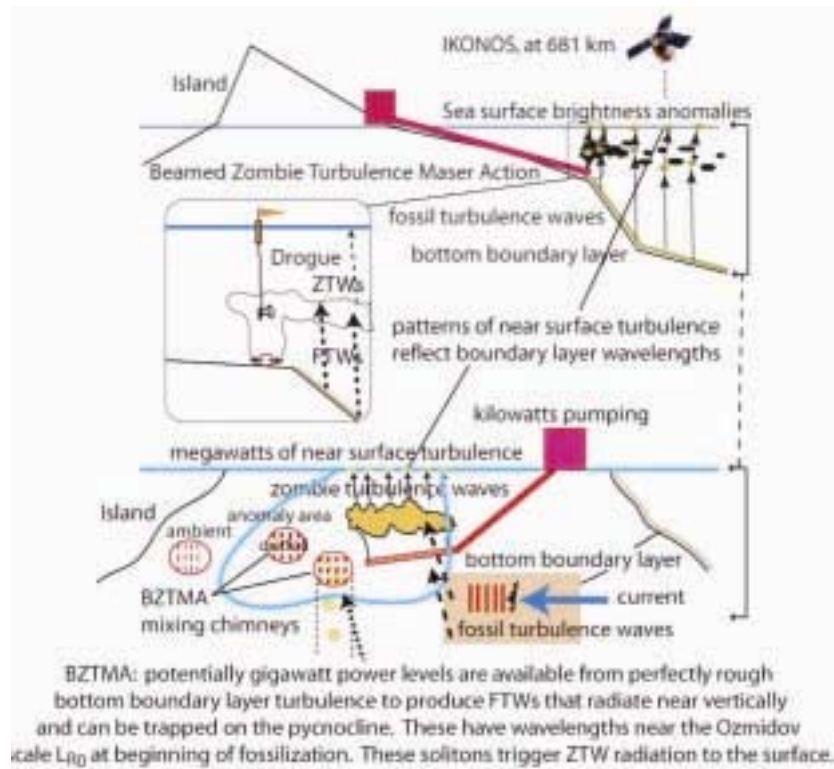


**Рис1в.** Физический механизм турбулентности и стратифицированная турбулентность.

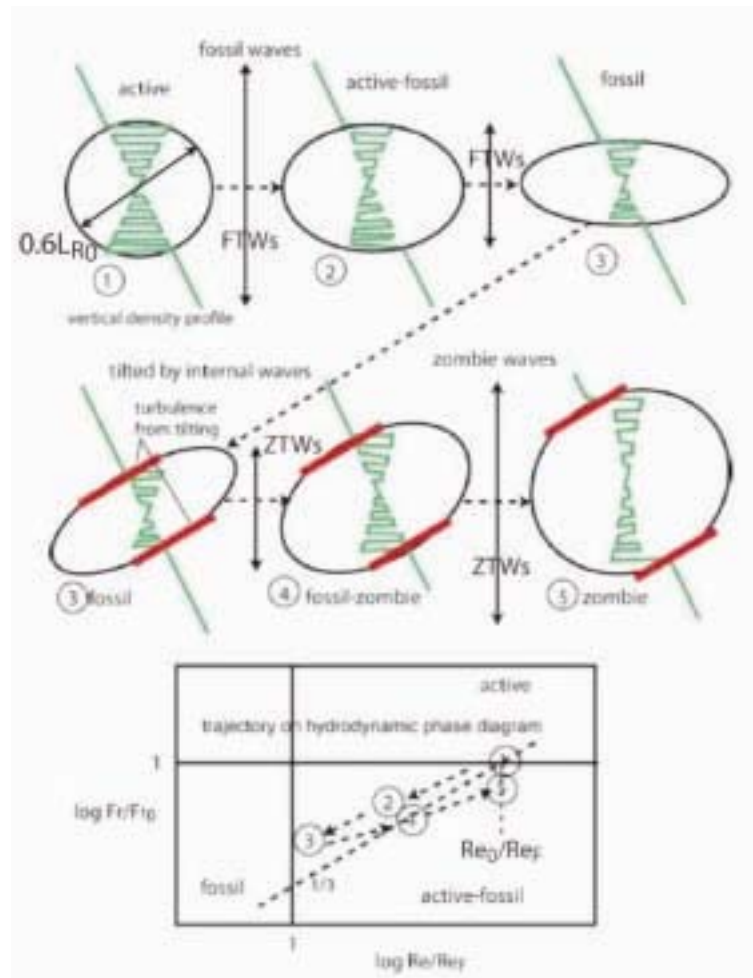
(а) Механизм увеличения вращательного турбулентного потока. Соседние одинаково направленные воронки производят инерционные вращательные силы  $\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}$ , вызывающие слияние. Около воронок с противоположными спинами пятно турбулентности под воздействием сил  $\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}$  расширяется.

(б) Турбулентность, реликтовая турбулентность и волны реликтовой турбулентности в стратифицированной жидкости производят воздействие мазера вертикальных внутренних волн, где турбулентная кинетическая энергия фоссилизируется силами всплывания и излучается почти вертикально в виде волн реликтовой турбулентности (FTWs). Т.к. вертикальная скорость FTWs совпадает с горизонтальной скоростью источника турбулентности, угол распространения составляет  $45^\circ$ . Поскольку существенная часть турбулентной кинетической энергии излучается почти вертикально узко-частотными FTWs с длинами  $\lambda \approx L_{R0}$  – это действие гидродинамического мазера.

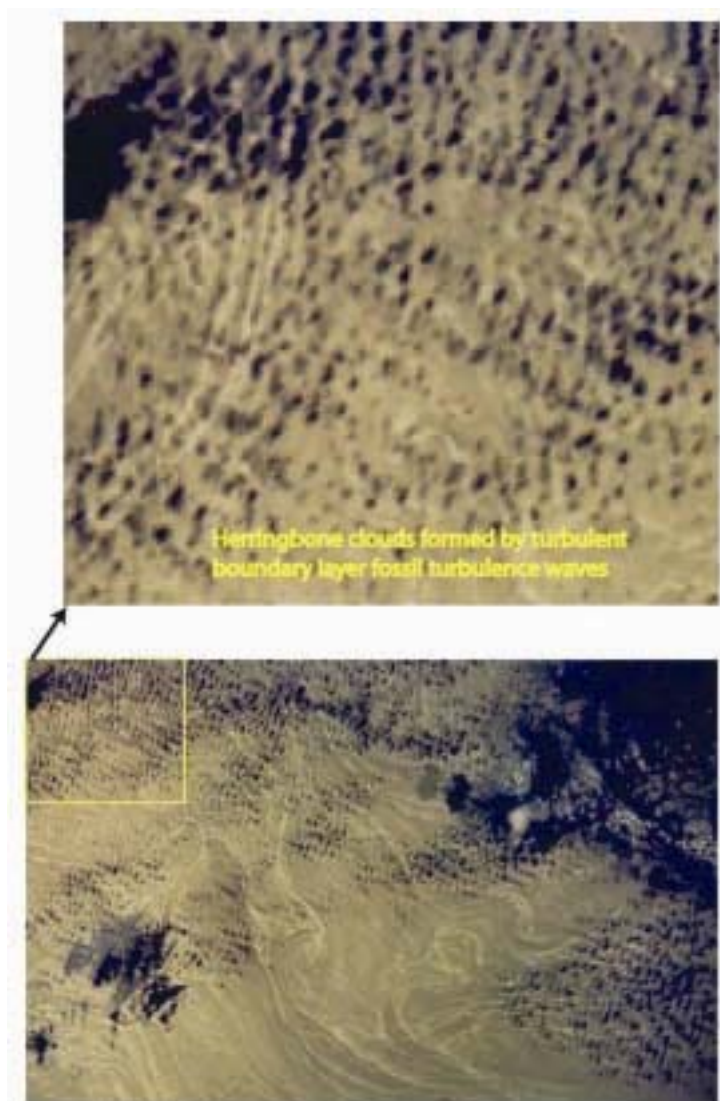




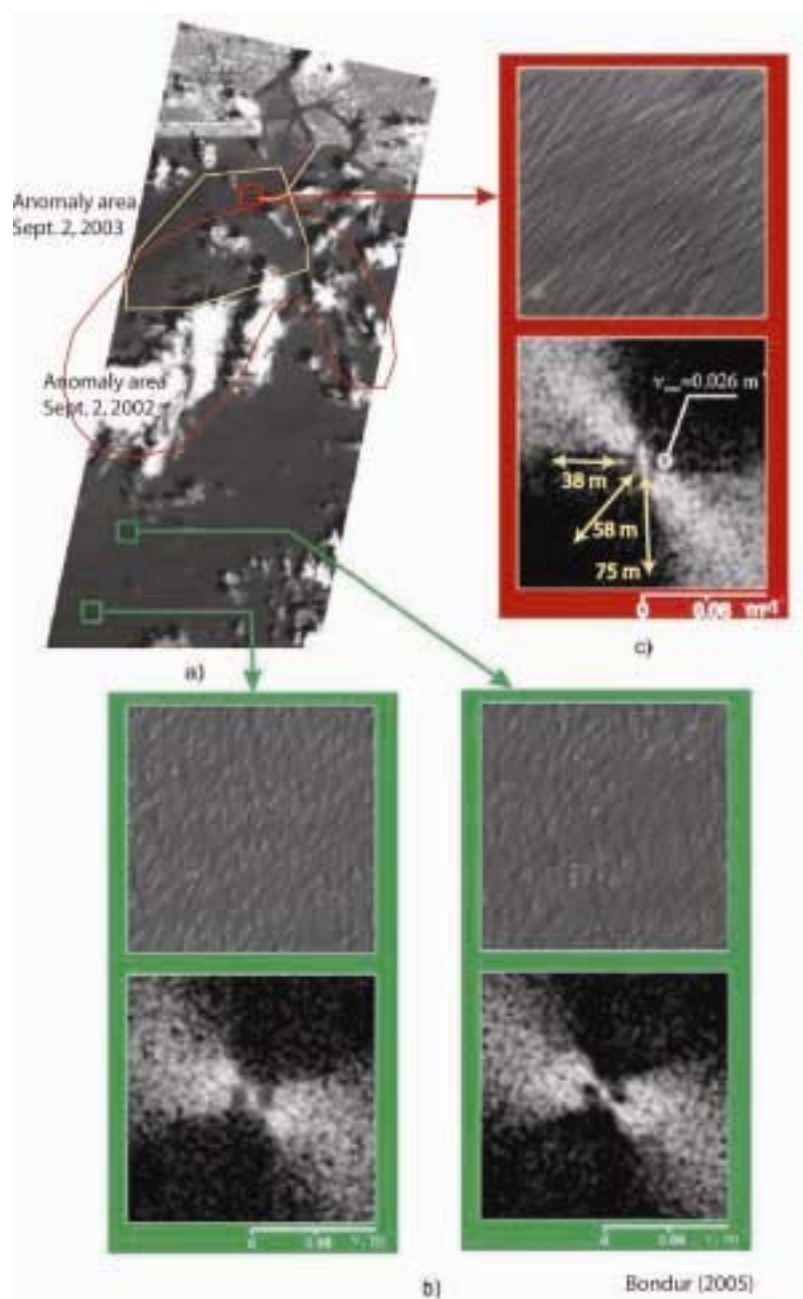
**Рис.1д.** Модель механизма воздействия мазера направленной турбулентности зомби (BZTMA) для дистанционного зондирования турбулентности сброса и реликтовой турбулентности. Смотрите объяснения в тексте.



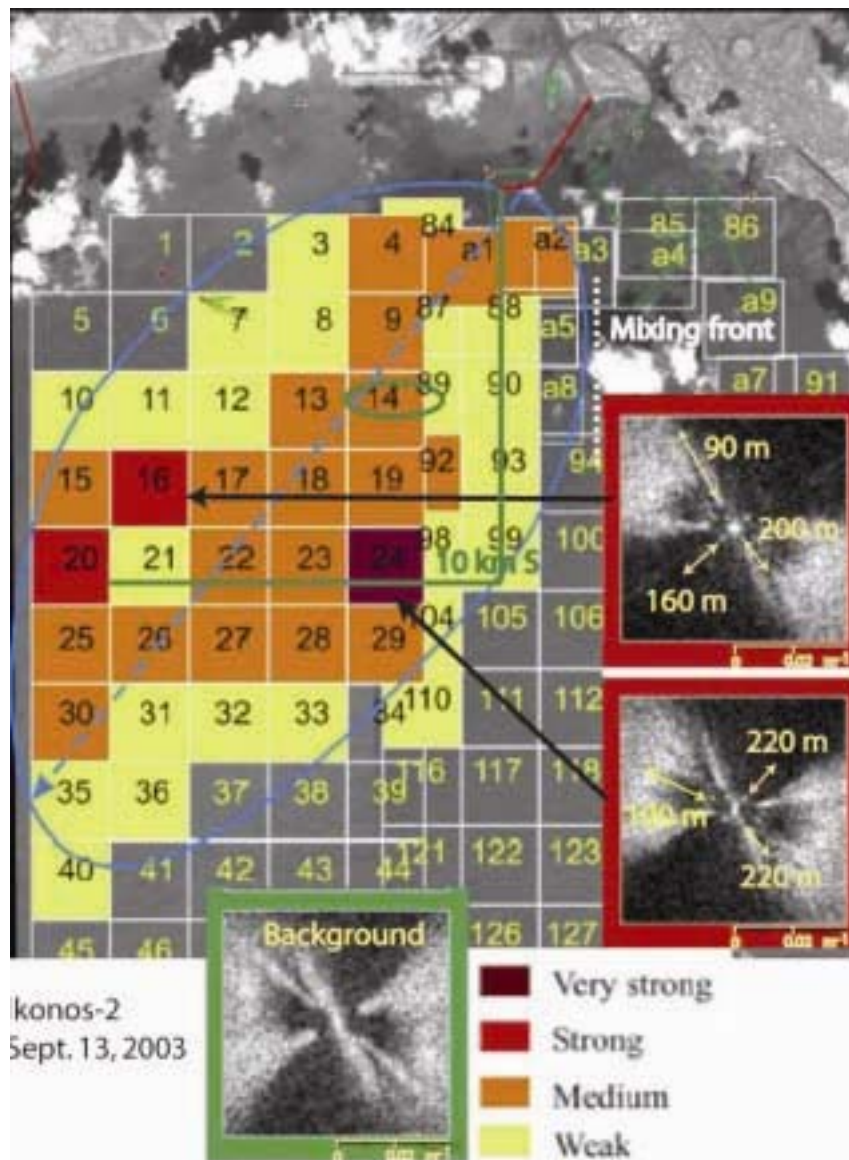
**Рис.2.** Эволюция активного турбулентного пятна (1) в стратифицированном океане. Стадии пронумерованы (1) – (5). Вертикальная плотность смешивается как активное реликтовое пятно (2) и начинает разглаживаться после испускания FTWs и приближается к полной фоссилизации (3). Пятно перемешивается фоновыми внутренними волнами, преобразуясь в пятно зомби турбулентности (4) и (5). Энергия, извлеченная образованием турбулентности на границах зомби, излучается в виде ZTWs. Траектория преобразований пятна отражена на гидродинамической диаграмме внизу. Фрагмент (1) – это начало фоссилизации с критическим числом Фруда и  $Re_0/Re_F = \varepsilon_0/\varepsilon_F$ . Пятно меняется как показывает пунктирная линия с наклоном  $\sim 1/3$  навстречу фоссилизации (1), (2), (3) и затем обратно, преобразуясь в формы зомби турбулентности (3), (4), (5).



**Рис.3** «Решетка» облаков, образующихся у морской поверхности при взаимодействии с образованным ветром пограничным турбулентным слоем, фоссилизирующимся на низкой частоте по шкале Ozmidova в устойчиво стратифицированной атмосфере. Волны реликтовой турбулентности излучаются почти вертикально и образуют облака. Обратите внимание на конфигурацию яркостных аномалий. Настоящее исследование объясняет их волнами реликтовой турбулентности, излучаемых заглубленной турбулентностью, образуемой на вихревых фронтах.

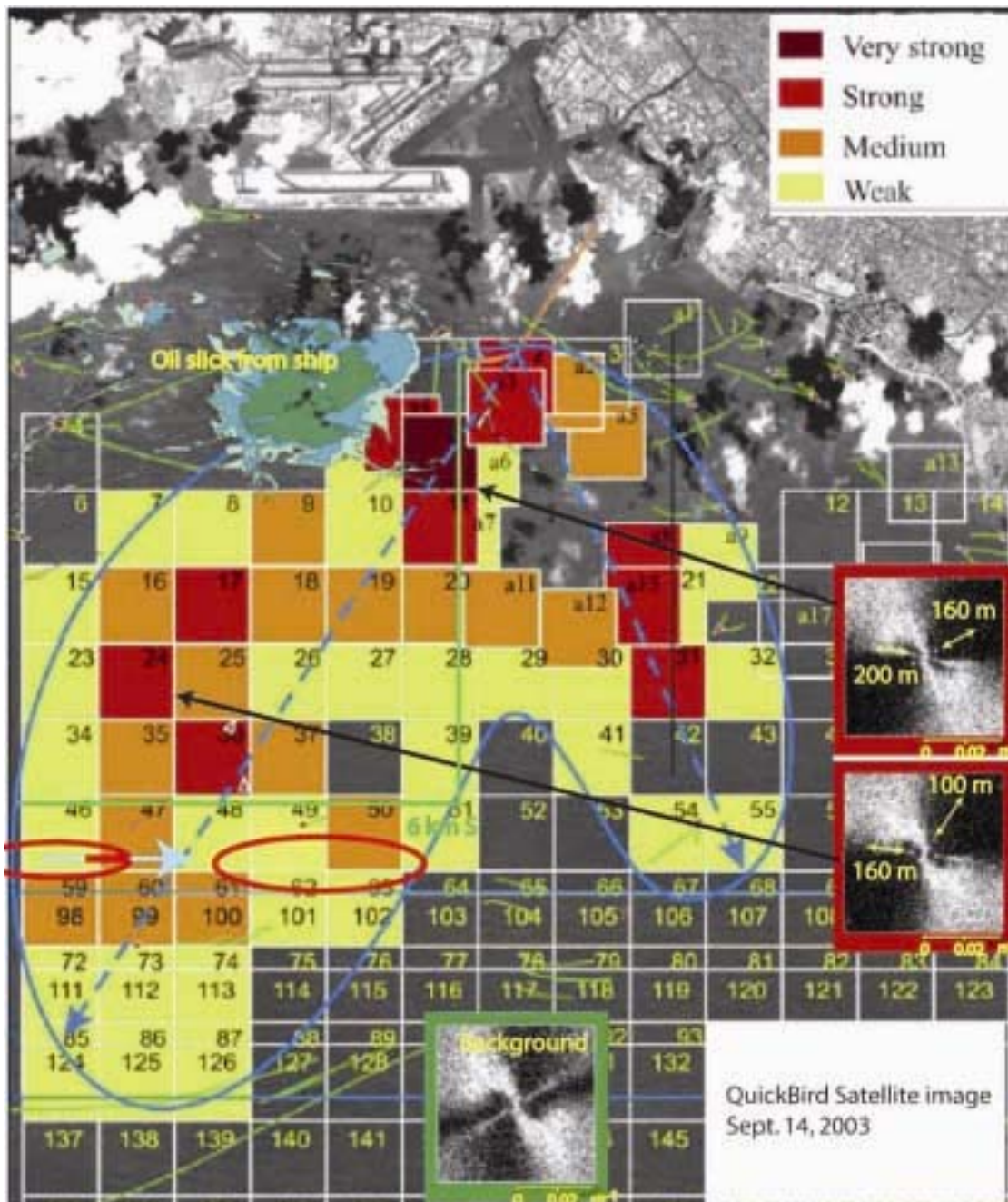


**Рис.4** Снимки яркостных аномалий от 2 сентября 2003 года со спутника Ikonos-2, Бондур(2004). Фрагмент спектральной аномалии (а) обнаружен к СЗ от конца диффузора с интенсивностью в 38,58 и 75м компонентов Фурье, ориентированных с востока на запад, с севера на восток и на север (двойные стрелки), не присутствуют на фрагментах(б). Аномалии, зафиксированные 2 сентября 2002 и 2003годов, выделены. Карты аномалий приводятся в работе Gibson et al (2005).

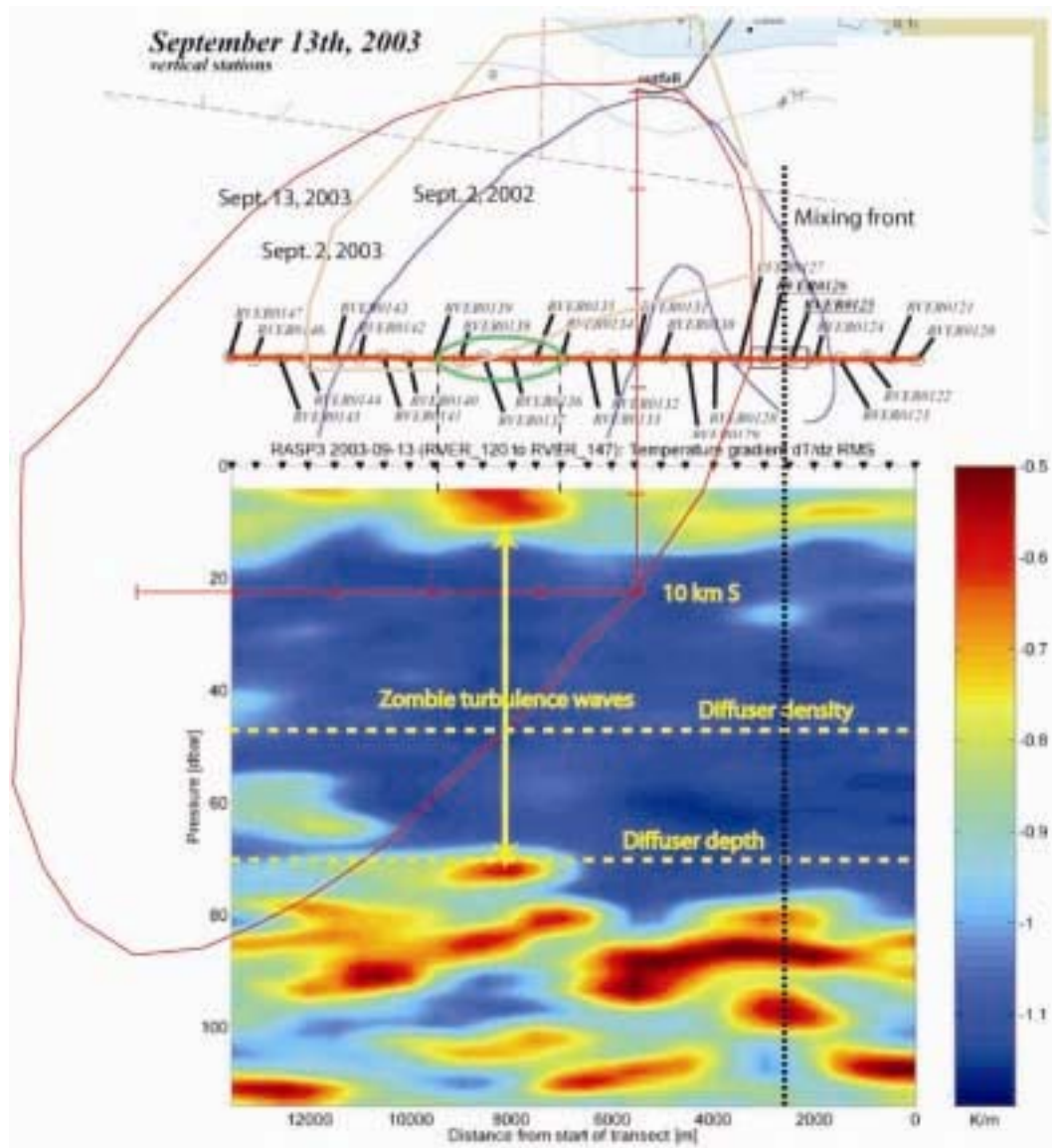


**Рис.5** Снимки яркостных аномалий от 13 сентября 2003 года со спутника Ikonos-2, Бондур(2004). Наибольшие значения элементы Фурье принимают при длинах волн в 90,160и 200 м на расстоянии в 8-10км к ЮЗ от диффузора. Вместо двух лепестков, простирающихся на 10км ЮЗ и 7км ЮВ, мы можем видеть один 20км ЮЗ лепесток, покрывающий площадь в 200 км<sup>2</sup> и выходящий за рамки участка, охватываемая спутниковой съемкой. Показанные фрагменты аномалий размером 2х2км, но и фрагменты 1х1 км расположены там же. Зеленые овалы соответствуют максимумам среднеквадратических температурных градиентов для 5,5 км вертикальных профилей, рис.7. Пунктиром обозначено прохождение фронта перемешивания на основании показаний измерений, рис.14.

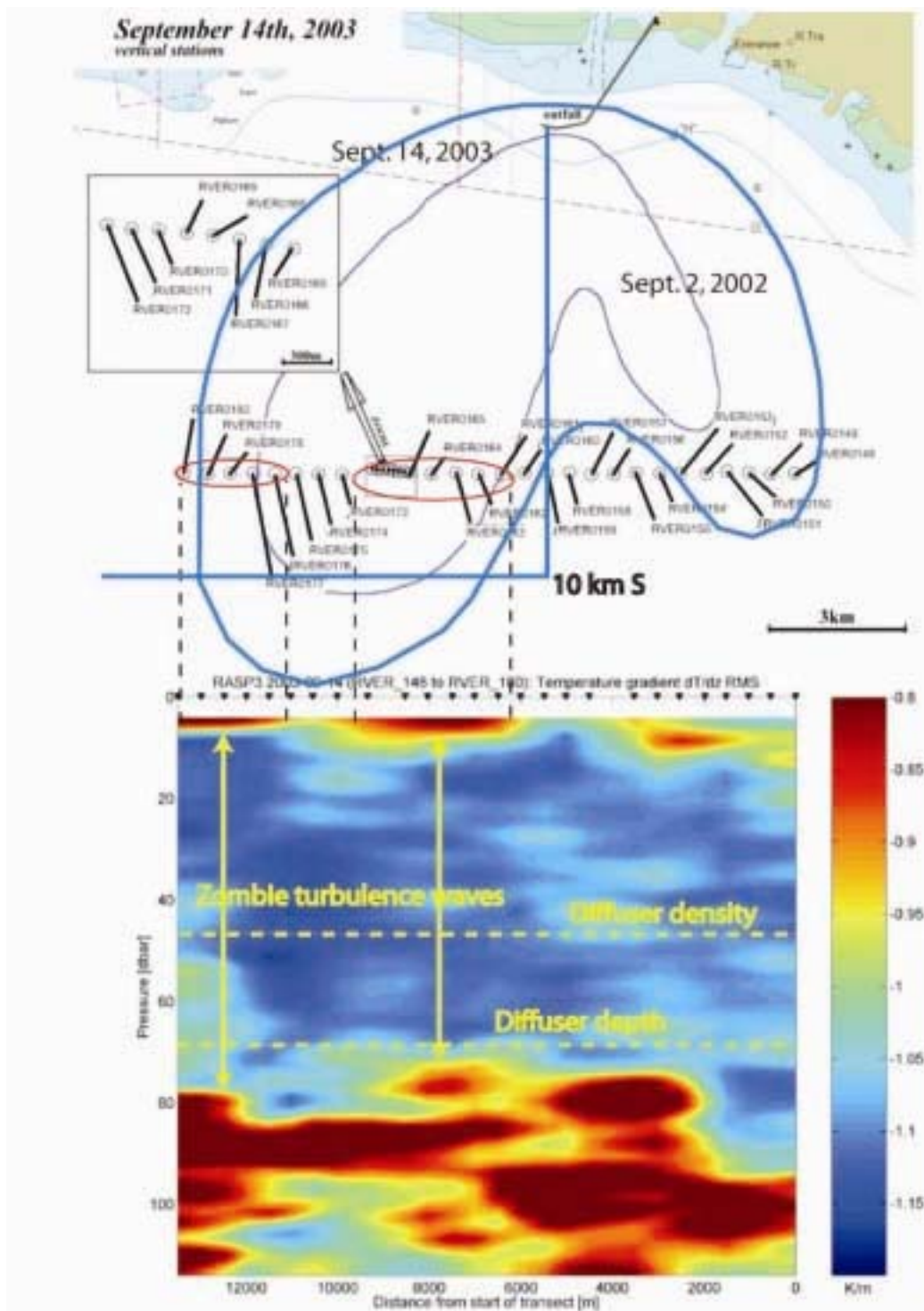




**Рис.6** Участки яркостных аномалий со снимков QuickBird от 14 сентября 2003 года, Бондур(2004). Наибольшие значения элементов Фурье приходятся на длины волн в 100,160 и 200 м. Два лепестка аномалий простираются на 22 км к ЮЗ и на 7 км к ЮВ, занимая  $\sim 400\text{км}^2$ . Два красных овала в фрагментах 16,17,18,19 соответствуют максимуму коэффициента температурной диссипации по данным вертикальных микроструктурных измерений, рис.8.

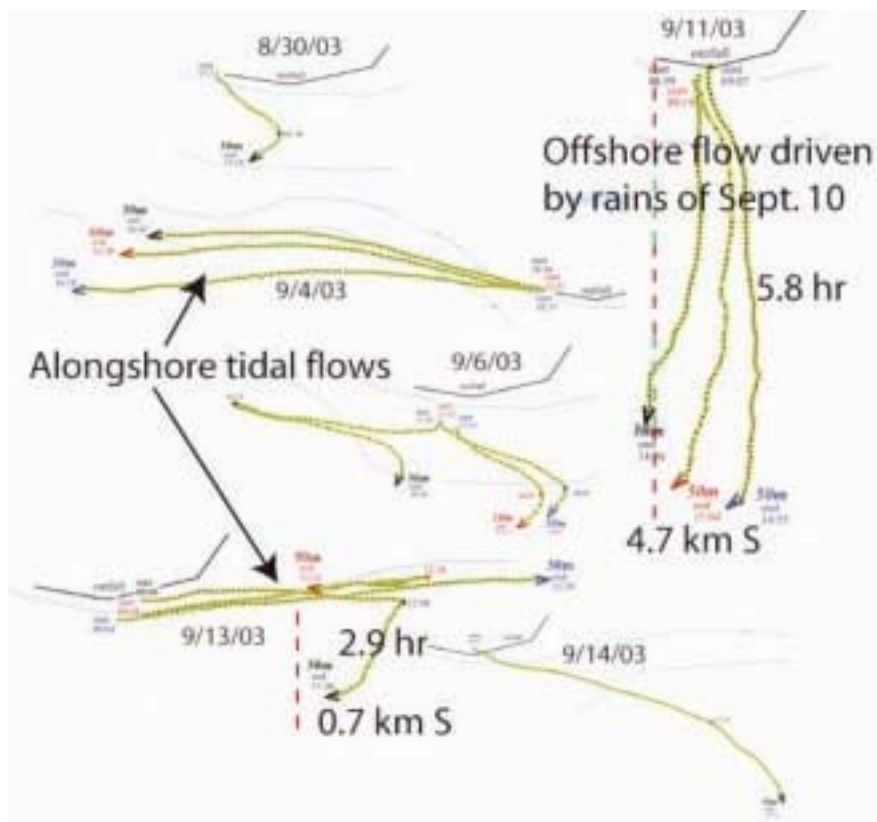


**Рис.7** График среднеквадратических значений коэффициента температурного рассеяния как  $\log (dT/dz)_{rms}$  по данным вертикальных профилей от 13 сентября 2003 года, установленных на расстоянии 5,5км южнее диффузора. Поверхностные признаки реликтовой температурной турбулентности интерпретируются как свидетельства разрушения волн зомби турбулентности (двойные стрелки) над глубиной остановки вод. 13 сентября 2003 года область яркостной аномалии составила  $200 \text{ км}^2$ , т.е в  $\sim 4$  раза больше аналогичной 2 сентября 2002 года.

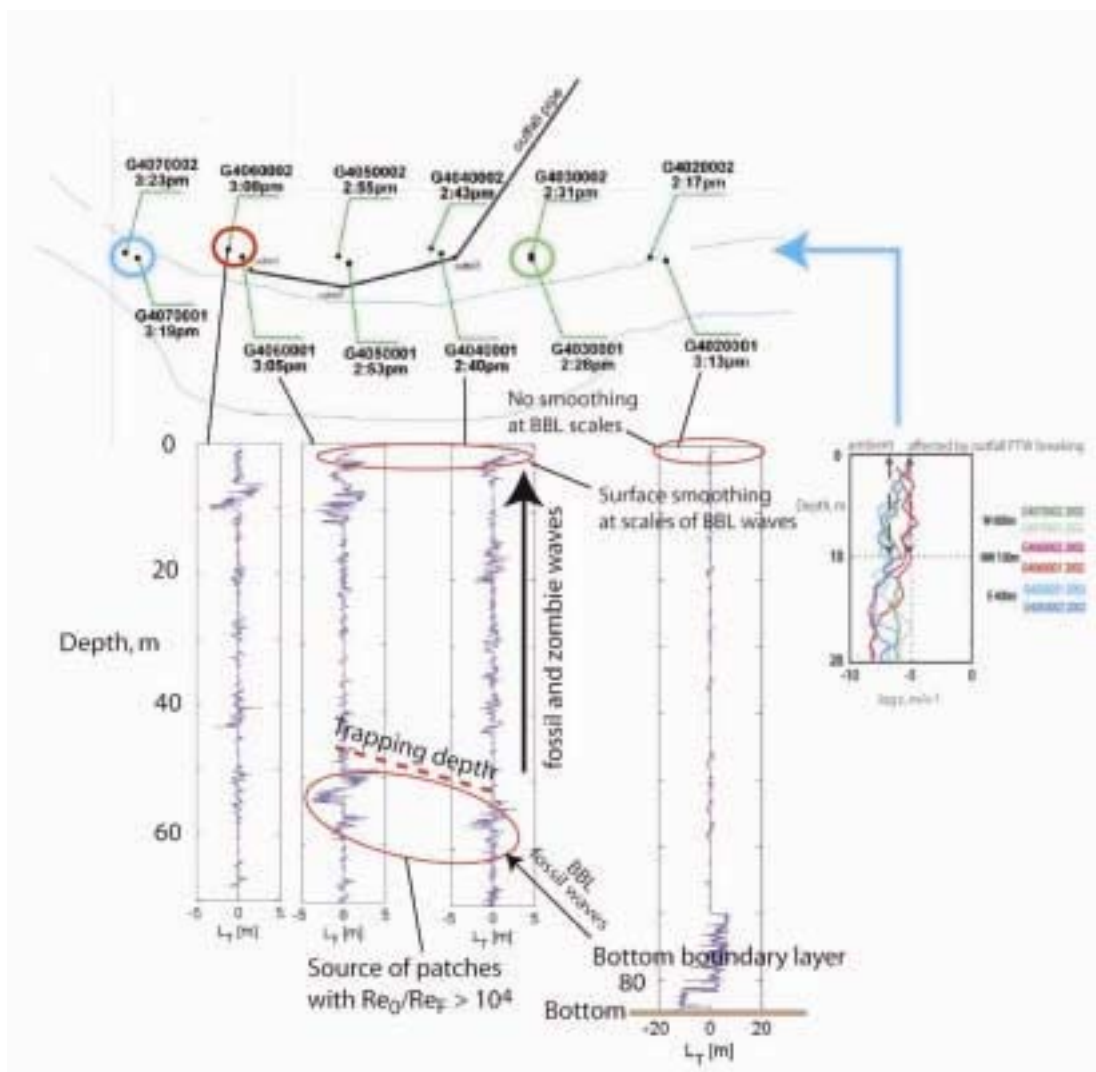


**Рис.8.** График среднеквадратических значений коэффициента температурного рассеяния по данным вертикальных профилей от 13 сентября 2003 года, установленных на расстоянии 7,5 км южнее диффузора. Область яркостной аномалии от 14 сентября 2003 несколько больше аналогичной от 2 сентября 2002 года.

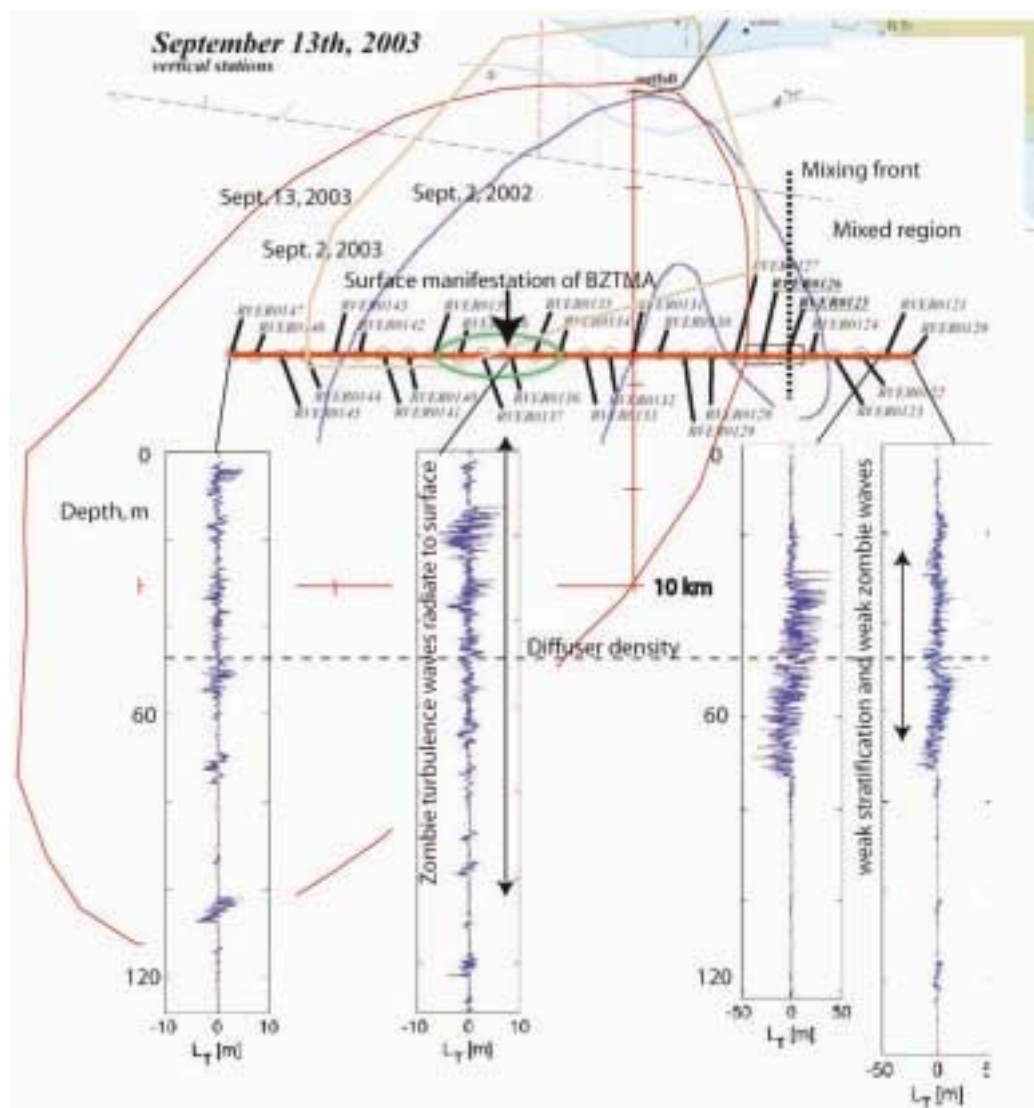




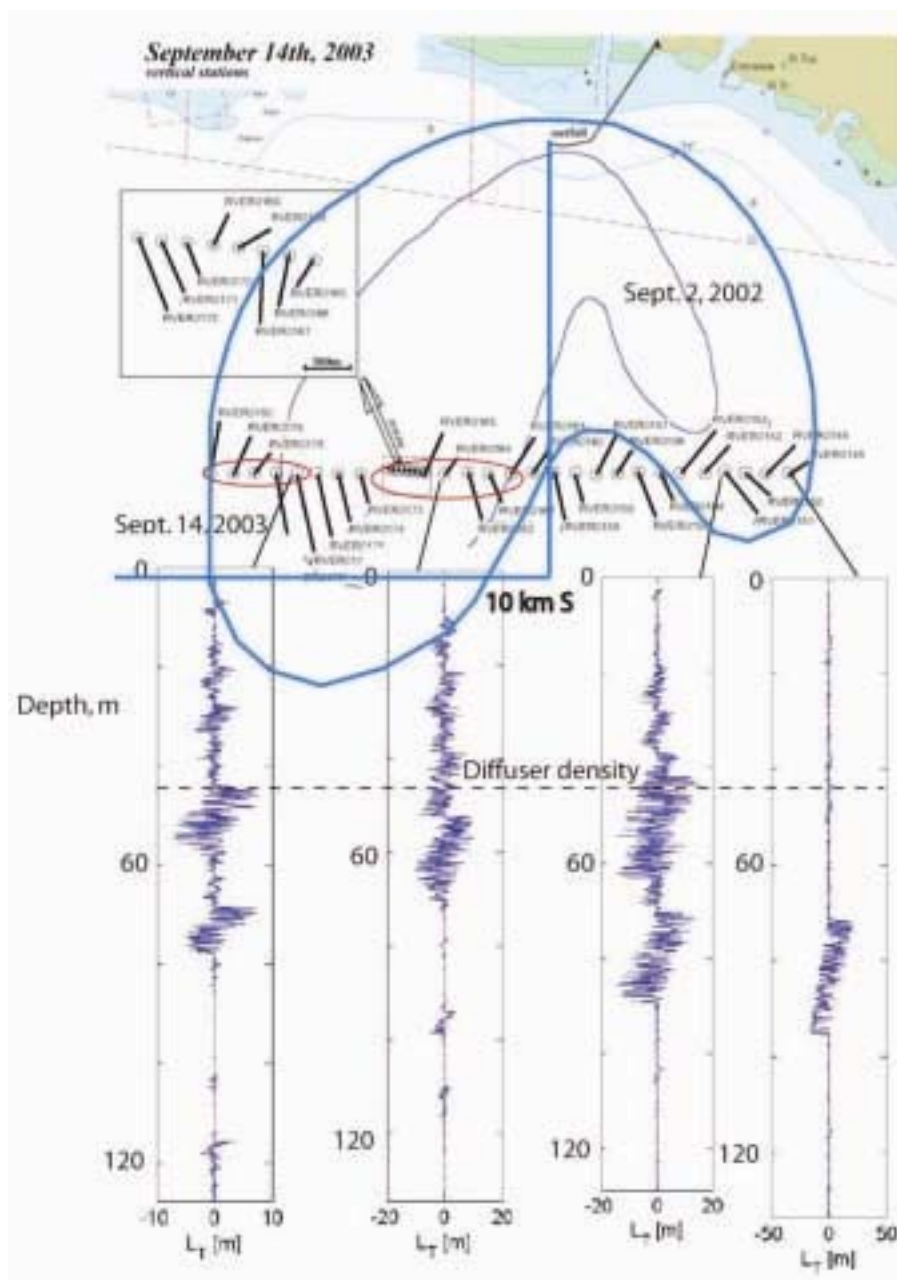
**Рис.9.** Траектории парашютных буев в ходе эксперимента RASP 2003. Дрейфующие буи были установлены около диффузора сточных вод на глубине остановки 30-50м. Точками вдоль траектории показаны места расположения буев GPS. Скорость приливных движений с востока на запад  $\sim 0,2$  м/сек как правило превышает прибрежное течение с севера на юг  $\sim 0,03$  м/сек. Исключением является наблюдаемое сильное течение от берега 11 сентября 2003, которое приписывается эстуариевому потоку от сильных дождей 10 сентября, управляемому вертикальным перемешиванием ВЗТМА, рис.17.



**Рис.10.** Данные вертикальных профилей по масштабам опрокидывания Торпа  $L_T$  в одном км к востоку от диффузора по пути обнаружения 15м придонного турбулентного слоя на глубине 85м. В этом пограничном слое не обнаруживаются проявлений  $L_T$ , способных выглаживать поверхность, в отличие от станций около диффузора, где возможны мелко-масштабные волны реликтовой и зомби турбулентности. В верхних 10 метрах вблизи от диффузора значения  $\epsilon = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}^3$  от разрушения волн реликтовой и зомби турбулентности (красный овал) превышают на два порядка фоновые показатели (зеленые и синие овалы).



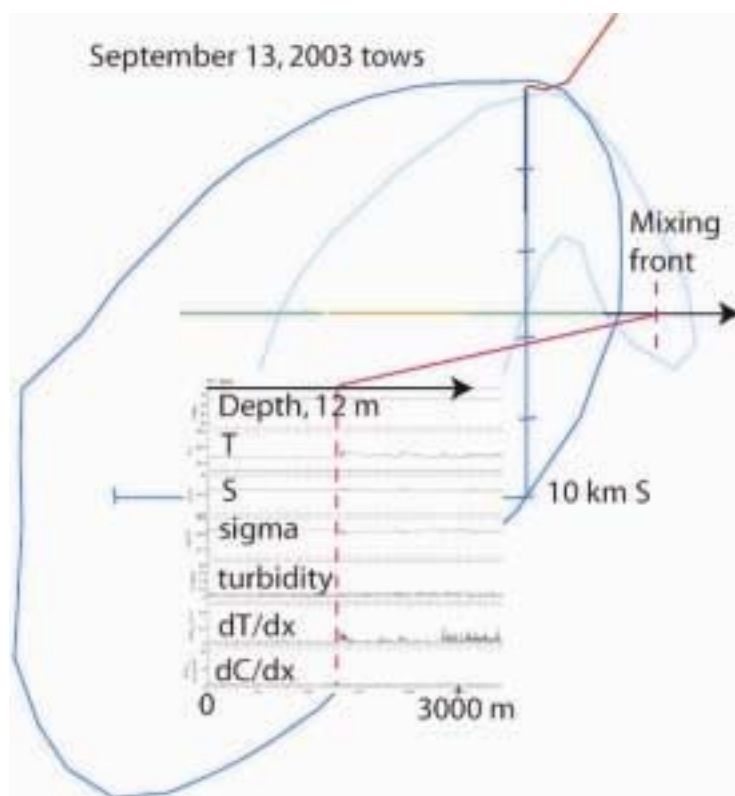
**Рис.11.** Показания вертикальных профилей значений опрокидывания Торпа к 5,5 км к югу от диффузора от 13 сентября 2004 года. Большие масштабы волн опрокидывания к востоку свидетельствуют о слабой стратификации, позволяющей рост пятен зомби турбулентности с незначительным излучением к поверхности. Информация о 8 м волнах опрокидывания зомби, превышающих 6 м реликты сброса, излучается на поверхность в структуре 100-200 м реликтовых волнах донного пограничного слоя.



**Рис. 12.** Показания вертикальных профилей значений опрокидывания Торпа к 7,5 км к югу от диффузора от 14 сентября 2004 года. Красными овалами выделены максимумы 6-10м масштабов опрокидывания, перемещаемых в каналах перемешивания ВЗТМА на запад вдоль пикноклина диффузора. Два профиля к востоку определили пятна зомби турбулентности с 10-20м значениями  $L_{TMAX}$ , перемешивающими вертикальный градиент плотности, уменьшая их выявляемость.

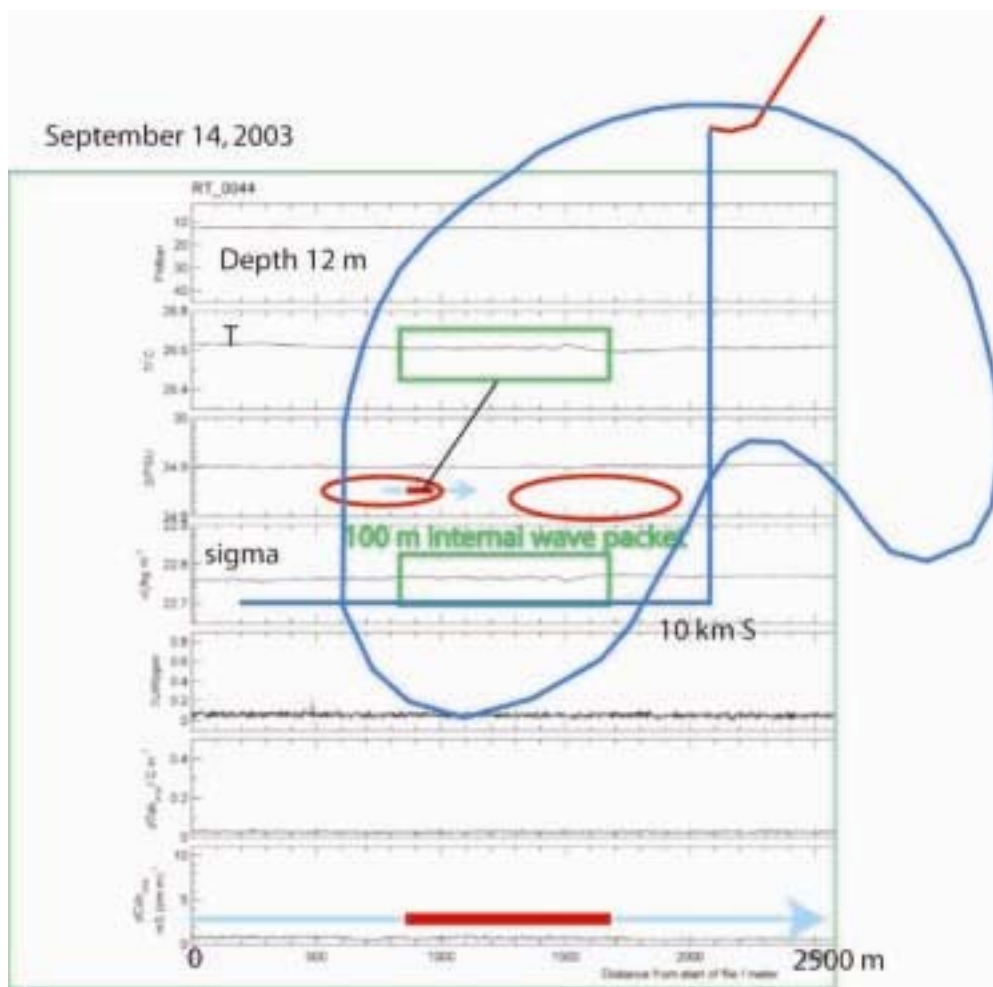


**Рис.13.** Установка MSS оборудования на корпусе катамарана. Допустимый максимум скорости в 2 м/сек превышался, но сенсоры температуры, проводимости и плотности были действующими.

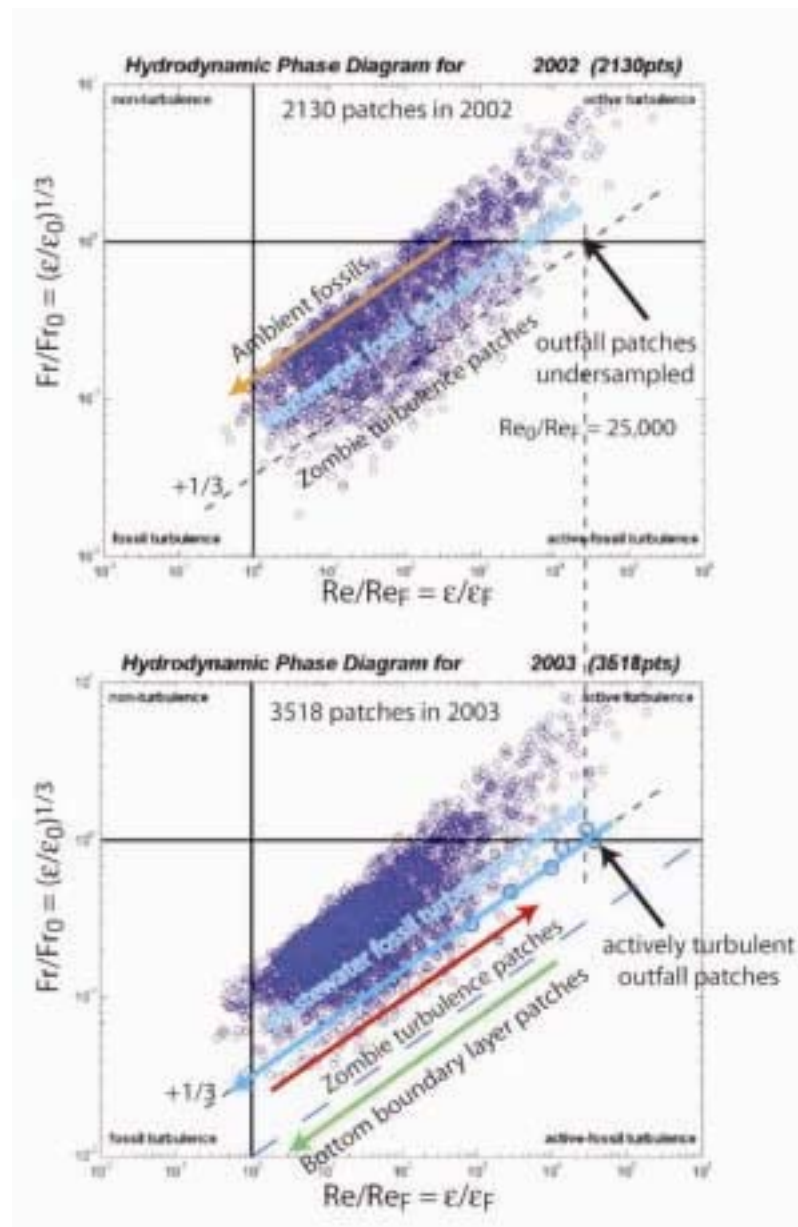


**Рис.14.** Траектория движения горизонтальных профилей 13 сентября 2003 в сравнении с конфигурацией района яркостных аномалий (рис.5 и 7). На основании данных вертикальных профилей (см. рис. 11) определен фронт перемешивания вне аномальной зоны, что говорит о том, что механизм ВЗТМА в ЮВ лепестке настолько смешался со стратификацией среды, что вертикальная передача информации не происходила.



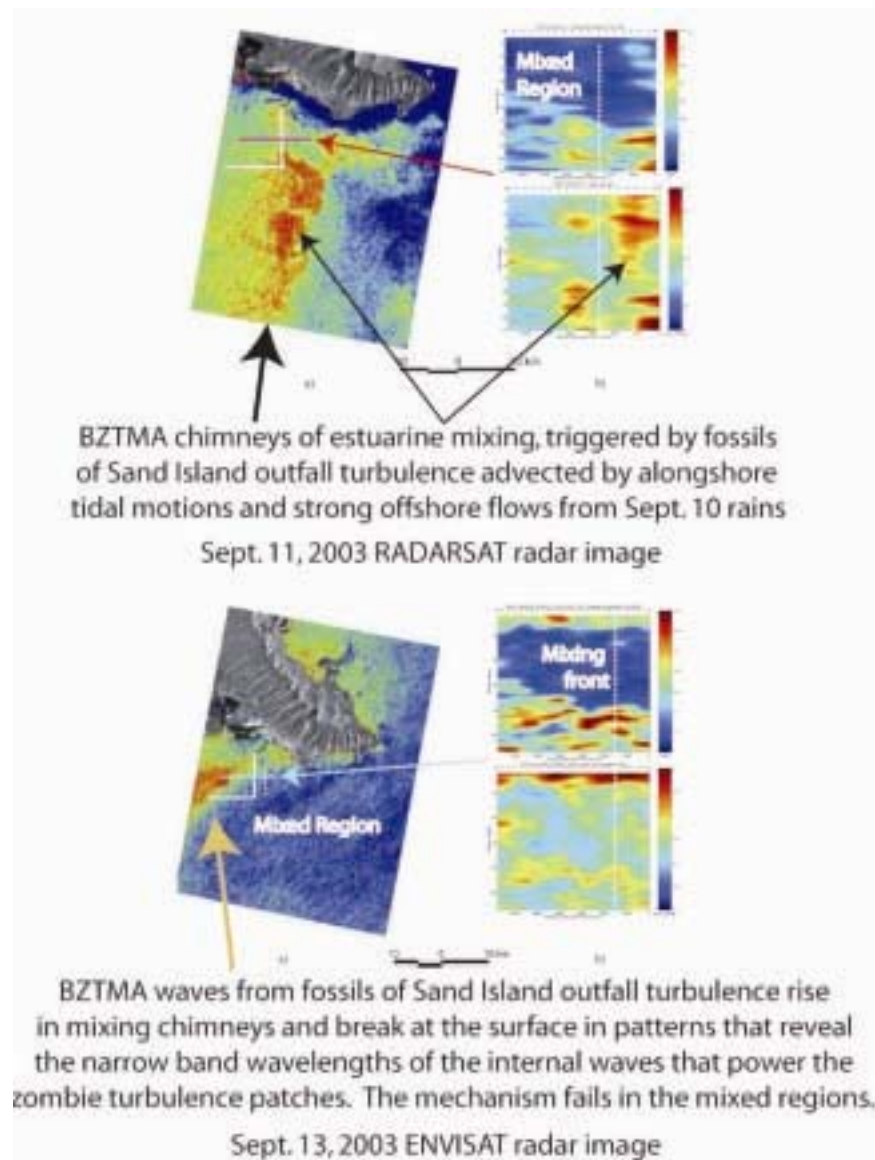


**Рис.15.** Траектория движения горизонтальных профилей 14 сентября 2003 в 7 км к югу от диффузора в сравнении с конфигурацией района яркостных аномалий (рис.6 и 8), выделенных голубым цветом, и температурная диссипация аномальных регионов (каналов перемешивания) в красных овалах. По температурным T и сигма сигналам плотности  $\sigma$  ( $10^3 \text{ кг м}^{-3}$ ) определен 900м пакет внутренних волн с длиной  $\lambda$  100м. Вертикальное смещение внутренних волн около 3м при глубине буксировки 12м. Наблюдается совпадение пакета с западным каналом перемешивания, рис.8, со шкалой, обозначенной голубой стрелкой.

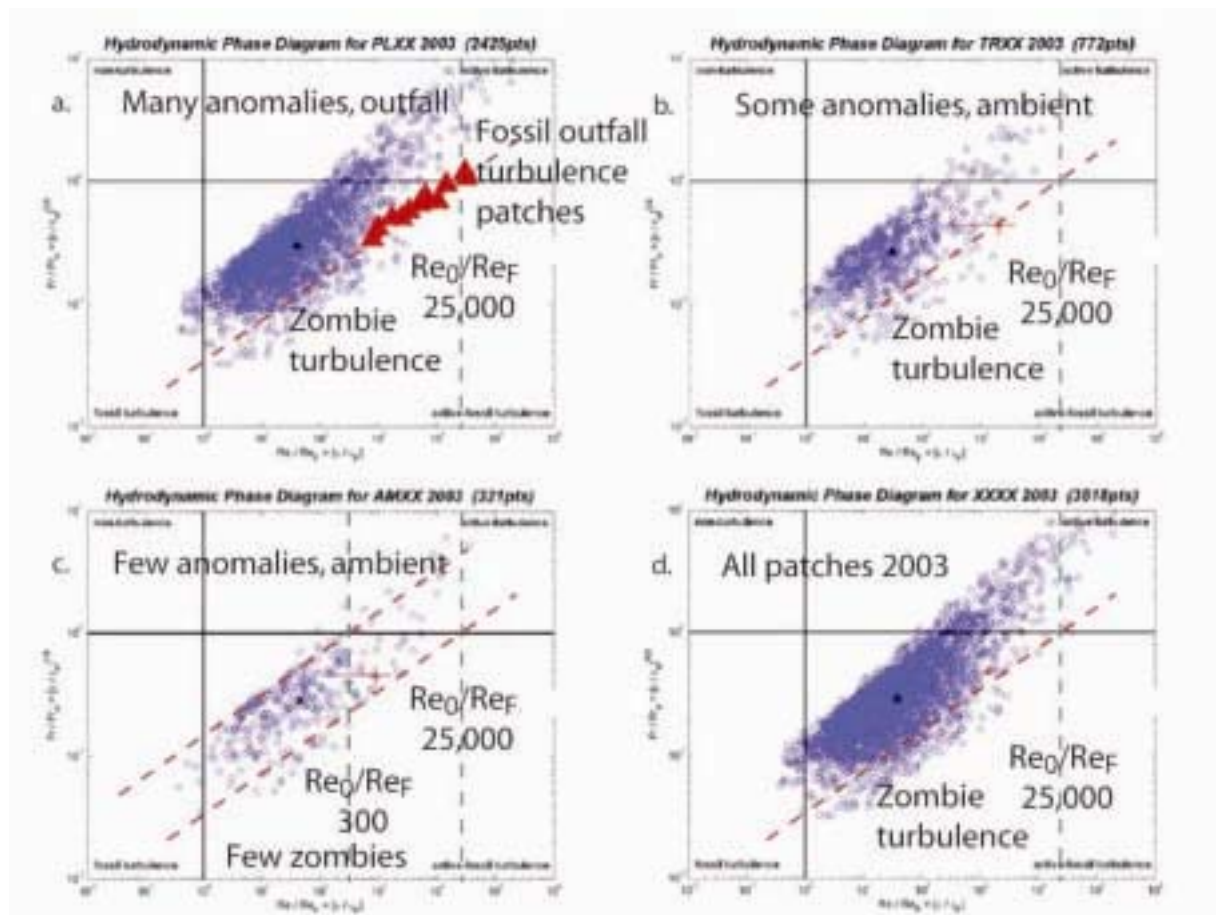


**Рис.16.** Элементы гидродинамической фазовой диаграммы для всех участков, определенных в ходе экспериментов RASP 2002 и 2003г.г. Рисунки свидетельствуют о том, что сбросовым устройством сточных вод производятся пятна турбулентности со значениями  $Re_0/Re_F=25000$ , значительно превышающими фоновые (оранжевая стрелка,  $Re_0/Re_F \sim 10^3$ ). Пятна, расположенные вправо от оси положения уклонов  $+1/3$ , интерпретируются как проявления турбулентности зомби (красная стрелка,  $Re_0/Re_F \sim 10^5$ ). Пятна турбулентности зомби излучают к морской поверхности информацию о длинах внутренних волн и их интенсивности, и, согласно модели BZTMA, извлекают энергию из внутренних волн. В ходе эксперимента RASP 2004 глубинные измерения показали реликты турбулентности донного пограничного слоя с значениями  $Re_0/Re_F=10^6$ .





**Рис.17.** Радарные снимки морской поверхности близ острова Оаху от 11 сентября (а,сверху) и от 13 сентября 2003г. (а,снизу) сравниваются со среднеквадратическими коэффициентами температурной (б, сверху-верх, снизу-верх) и вязкой диссипации  $\epsilon$  (б, сверху-низ, снизу-низ), полученными по данным заглубленных зондов. Сильные дожди 10 сентября 2003 года настолько увеличили эстуариевое перемешивание, что возобладали над перемешиванием 11 сентября, предотвратив определение заглубленной реликтовой турбулентности с помощью RADARSAT спутника. ЮЗ лепесток яркостной аномалии, занимающий  $200\text{км}^2$ , наблюдался на снимке с IKONOS и даже превосходил по размерам ЮЗ лепесток аномалии, снятый с помощью RADARSAT (а, низ). Очевидно, что размер ЮЗ лепестка отражает адвекцию реликтов турбулентности сброса от о. Санд, зафиксированную дрейфующими буями 11 сентября (см. рис.9) вследствие вклинивающегося эстуариевого потока. Мощная эстуариевая турбулентность отражена на снимке (б,верх) по-видимому от прямого выглаживания поверхности волнами реликтовой турбулентности при недостаточно сильном поверхностном температурном градиенте перемешивания и  $\epsilon$  (б, верх).



**Рис.18.** Гидродинамическая фазовая диаграмма для эксперимента RASP2003. Расположение точек определяется в зависимости от попадания в зону яркостных аномалий. В части а) представлены точки с сильной аномалии, включая зону сброса. Все остальные точки аномалий (кроме района сброса) приводятся в части б). Точки без аномалий вне зоны сброса расположены в части в). Все исследованные точки представлены в части д).