



**Russian Academy of Sciences  
Karelian Scientific Centre  
Northern Water Problems Institute**

**Proceedings of the 7<sup>th</sup> Workshop on**

**PHYSICAL  
PROCESSES IN  
NATURAL WATERS**

**2-5 July 2003  
Petrozavodsk, Russia**



**Petrozavodsk, 2003**

## Исследование физических процессов в прибрежной зоне по определению антропогенного воздействия средствами дистанционного зондирования

В.Г.Бондур<sup>1</sup>, Н.Н.Филатов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-образовательный центр «Аэрокосмос» Московского государственного университета геодезии и картографии, Москва E-mail: vgbondur@online.ru

<sup>2</sup>Институт водных проблем Севера, Петрозаводск, Россия  
E-mail: nfilatov@nwpi.karelia.ru

Комплексное исследование физических процессов в прибрежной зоне по определению антропогенного воздействия на прибрежные воды средствами дистанционного зондирования было проведено в шельфовой зоне о.Оаху, Гавайи, в августе-сентябре 2002 г. (Бондур, Виноградов и др., 2003). С использованием данных наблюдения с буйковых станций был проведен анализ поверхностного и внутреннего волнения, турбулентности, микроструктуры, течений и приливов.

### *Материалы и методы исследований:*

Для регистрации было использовано несколько буйковых станций, из них две буйковых станции в шельфовой зоне на глубинах ~ 60 м для измерения течений с использованием ADCP, одна – с использованием термистора Aanderaa, три – для измерения поверхностного волнения (Sullivan, Dayananda, 1996; Oceanit, 2003). Также с борта корабля проводились измерения турбулентности, микроструктуры, полей температуры, солености и электропроводности с использованием зондов (MSS) (Gibson et al, 2003). Была разработана методология обнаружения заглубленных сбросов сточных вод и определения их формы и размера с использованием данных дистанционного зондирования высокого разрешения, полученных со спутников Ikonos-2 и QuickBird.

### *Течения*

Изменчивость течений проанализирована во временной шкале от нескольких минут до 36 часов, т.е. от частоты Вайсяля-Брендта до локального инерционного периода. Были построены трехмерные прогрессивно-векторные диаграммы течений, наблюдаемых на станциях В2 и В4 для различных глубин. Эти диаграммы позволили определить траектории передвижения водных масс. Течение, направленное вдоль берега с направлением 220° (т.е. юго-западное) преобладало на глубинах 10, 30 и 60 м с квазиволновыми колебаниями полей течений в юго-западном – юго-восточном направлениях.

На станции, расположенной вблизи диффузора, компоненты  $V_e$  и  $V_n$  на всех глубинах в основном находятся под воздействием полусуточных приливных колебаний. Должно быть также отмечено, что колебания амплитуд скоростей на всех глубинах практически синхронны.

### *Векторно-алгебраический метод анализа океанических течений*

Данные по скоростям течений, полученные в сентябре 2002 г. в рамках проекта, были обработаны с использованием анализа векторного временного ряда. В настоящее время из-за отсутствия единой общепринятой методики анализа временного ряда, обработка данных по течениям представлена на основе подстановки вектора скорости: проекции вектора скорости на декартовы оси (метод компонент); комплекснозначный метод, который представляет комплексное число, его действительные и мнимые члены, равные проекциям скорости вектора на декартовы оси; метод вращательных компонент (см. Mooers, 1973; Gonella, 1972). В данной работе был применен усовершенствованный векторно-

алгебраический метод, разработанный Рожковым и др. (1983). Наиболее общая модель океанских течений – это представление их в форме нестационарных неоднородных векторных стохастических функций с величинами в евклидовом пространстве (см. Limnology and Remote sensing, 1999).

Основными вероятностными характеристиками скоростей течений мы принимаем ожидаемый вектор  $V$ , тензор корреляции, определяемый как ожидание тензора произведения векторов, и тензоры спектральной плотности, определяемый с помощью одно- и двукратного преобразования Фурье функции корреляции. Функции  $S_V(\bullet)$  характеризуют распределение частот колебаний скоростей течений и дают качественную оценку интенсивности таких колебаний и их ориентацию в принятой системе координат и изменения во времени. Упомянутые вероятностные характеристики инвариантны по методу определения и не зависят от выбора системы координат. Свойства тензор-функций  $K_V(\bullet)$ , а также свойства процесса  $V(t)$  могут быть более полно открыты посредством набора инвариантных скалярных функций. Основными проблемами обработки и анализа данных являются формулировка правила оценки и определение степени приближенности оценки к вероятностной характеристике.

Анализ временного ряда вектора течений в эксперименте позволяет установить влияние приливных полусуточных явлений ( $\omega \sim 0.5 \text{ rad}\cdot\text{h}^{-1}$ ), а также были определены небольшие суточные ( $\omega \sim 0.26 \text{ rad}\cdot\text{h}^{-1}$ ), с большим периодом ( $\omega < 0.1 \text{ rad}\cdot\text{h}^{-1}$ ) и 6-часовые ( $\omega \sim 1 \text{ rad}\cdot\text{h}^{-1}$ ) флуктуации. Суточные флуктуации течений в верхних слоях (0-10 м) вызваны суточными изменениями метеорологических параметров. Анализ высокочастотных спектральных диапазонов горизонтальных и вертикальных компонент вектора течений показал, что у внутренних волн с коротким периодом также происходят турбулентные движения различного происхождения. Приливный эллипс в верхнем слое имеет большую анизотропию по сравнению с наблюдаемым на глубине более чем 30 м. В сравнительно высокочастотном спектральном диапазоне течений ( $\omega \geq 1.0 \text{ rad}\cdot\text{h}^{-1}$ ) не наблюдалось каких-либо заметных флуктуаций скоростей. Таким образом, наш анализ индикатора вращения показывает, что в низкочастотном диапазоне вращения направлено по часовой стрелке (инерционные колебания), тогда как приливная составляющая вращалась против часовой стрелки на всех глубинах. Вращение вектора течений с полусуточным периодом объясняется тенденцией направления основного течения в зону свала глубин. Колебания течений в верхних слоях с суточным повторением (сентябрь, глубины 0 – 30 м) могут быть вызваны суточными изменениями метеорологических параметров.

#### *Распределения температуры воды и внутренние волны*

Данные по солености и температуре воды собирались на пяти станциях с использованием CTD “Seabird” и зондов MSS. Исследования солености вблизи диффузора показывают сложные вертикальные профили солености, которые наиболее вероятно вызваны интрузией вод, сбрасываемых через диффузор. Данные с термистора Aanderaa позволяют оценить изменчивость температуры на станции В2 на глубинах 18-60 м. Полученные данные по температуре позволили дать оценку плотности спектра внутренних гравитационно-инерционных волн во временном диапазоне, изменяющемся от локального инерционного диапазона до короткопериодных интервалов в 15 минут, типичных для локальной частоты Брендта-Вайсяля. Данные анализа ясно показывают, что существует сильная корреляция между изменениями температуры морской воды, регистрируемыми на глубине 60 м и регулярным повышением и понижением уровня океана, вызванным приливными силами. Следует отметить, что фаза высокой воды (прилива) соответствует увеличению температуры воды на глубинах 30-60 м. При этих условиях термоклин опускается на более глубокие слои. Спектральный анализ температуры воды показывает, что спектральный

максимум наблюдается на частоте полусуточных колебаний ( $\omega \sim 0,5 \text{ rad}\cdot\text{h}^{-1}$ ), где он обнаруживается наряду с некоторыми небольшими максимумами (временная шкала изменяется от 3 до 12 часов). Эти спектры говорят о существовании гармоник, соответствующих группам внутренних волн, имеющим случайные фазы и амплитуды.

«Быстрые» изменения температуры, наблюдаемые над диффузором, имеют большое влияние на распространение сточных вод и на уровень концентрации загрязнений в акватории. Резкие изменения температуры и скоростей течений, возможно, связаны с внутренними волнами, вызванными приливными волнами, сталкивающимися со склоном берега. Спектр внутренних волн (см. рис. 1) имеет главный максимум на приливной частоте ( $\omega \sim 0.5 \text{ rad}\cdot\text{h}^{-1}$ ), и наименьший максимум в диапазоне высоких частот ( $\omega / 1 \text{ rad}\cdot\text{h}^{-1}$ ), вызванный короткопериодными внутренними волнами. На основании данных на глубине изотермы  $25^\circ\text{C}$  был построен частотно-временной спектр  $S(\omega, t)$  посредством вычисления спектров внутренних волн для нескольких промежутков времени за период наблюдения нестационарных спектров внутренних волн за разные интервалы времени. Эти спектры, составленные по пяти интервалам времени, определяют распределение энергии на временных промежутках, изменяющихся от суточных до соответствующих локальной частоте Брэндта-Вайсяля  $N(z)$ . Эти рисунки показывают существенную изменчивость спектров во времени. Как правило, там наблюдается наличие максимумов на приливной полусуточной частоте ( $\omega \sim 0.5 \text{ rad}\cdot\text{h}^{-1}$ ). Когда энергия полусуточных приливных волн достигает максимума, в спектральном диапазоне высокой частоты нет значительных максимумов ( $\omega/0.5 \text{ rad}\cdot\text{h}^{-1}$ ) (см. рис. 1(a)). Когда амплитуда приливных волн в этом спектральном диапазоне уменьшается, наблюдаются высокочастотные максимумы, соответствующими 6 и 3 часам. В спектральном диапазоне высокой частоты не было обнаружено каких-либо значительных периодических флуктуаций, и уклон спектра внутренних волн был пропорционален  $\omega \sim \eta^{-2}$ , что типично для внутренних океанских волн.

Также было обнаружено наличие преобладающих полусуточных приливных внутренних волн со средней амплитудой 8 м и суточными колебаниями со сравнительно меньшими амплитудами. Опускание термоклина вызывает интенсивные внутренние волны с наименьшей амплитудой 30 м, которые могли привести к поднятию сбрасываемых сточных вод в приповерхностный уровень. Спектральный анализ температуры воды и полей температуры позволил обнаружить быстрые изменения температуры над диффузором (вызванные внутренними волнами, которые проявляются потом, когда приливные волны ударяются о крутой склон берега). Это ведет к подъему сточных вод и увеличению концентрации загрязнений в морской воде.

#### *Турбулентность и микроструктура*

Всесторонние измерения микроструктуры и турбулентности, проведенные проф. К.Гибсоном (Gibson et al., 2003) в течение эксперимента, показали, что скорость истечения струи является источником активной локальной турбулентности в непосредственной близости диффузора. Разбавленный сток формирует восходящее, всплывающее турбулентное пятно, которое останавливается под поверхностью моря, формируя частично фоссилезированные турбулентные микроструктурные участки. Участки перемешиваются местными течениями.

Этот процесс фоссилезации турбулентности и регенерации повторяется по вертикали и останавливается обрушением волн на поверхности, которое сталкивается с полем поверхностного волнения. Это порождает аномалии поля поверхностного волнения, обнаруживаемые дистанционными методами. Наблюдаемые явления были вызваны другими физическими механизмами взаимодействия поверхностных и внутренних волн (Bondur and Grebenuk, 2001).

### Поверхностные волны

Для определения спектров поверхностного волнения в акватории бухты Мамала использовались волномеры (волнографы) – два бую Directional Waveriders и Trident Directional Wave buoy. Обработка данных измерений in-situ позволила определить параметры, описывающие важные волновые процессы, наблюдаемые на станциях, и конкретно  $S(\omega, \theta)$  и  $S(\omega)$ . Анализ этих спектров  $S(\omega)$ , наблюдаемых на станциях проводился в спектральном диапазоне  $0,157 \leq \omega \leq 3,644 \text{ с}^{-1}$ , т.е. в диапазоне гравитационных волн. Они имеют, по крайней мере, три очевидных спектральных максимума на следующих частотах:  $\omega_{\max 1} \approx 0,41 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_{\max 2} \approx 0,69 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_{\max 3} \approx 1,57 \text{ с}^{-1}$ . Это позволяет предположить существование в исследуемой акватории трех волновых систем, что серьезно усложняет анализ волновых процессов. Пространственные периоды ветрового поверхностного волнения могут быть определены с помощью эмпирической оценки спектров волнения. Например, использование метода Пирсона-Московитца дает величины пространственных периодов от 10 м до 55 м. Это позволяет предположить, что волновое поле, наблюдаемое в регионе, находилось под воздействием двух систем волновой зыби, имеющих средние длины  $\lambda \sim 370$  м и  $\lambda \sim 130$  м, а также системы ветровых волн ( $\lambda \sim 25$  м). Спектральная плотность  $S(\omega)$  зыби с  $\lambda_{\max}^{(1)} \approx 370$  м была в 5.8 раз больше, чем зыби с  $\lambda_{\max}^{(2)} \approx 130$  м и в 22.5 раз больше чем величина  $S(\omega)$  для ветровых волн. Спектральные максимумы, ясно видные в частотно-ориентированных спектрах  $S(\omega, \theta)$ , позволяют определить направления распространения выбранных волновых групп и их динамику.

Величины длин волн для обнаруженных спектральных максимумов совпадают с определенными по изображениям «Ikonos-2» по пространственным спектрам  $S(k_x, k_y)$  в диапазоне регистрируемых масштабов.

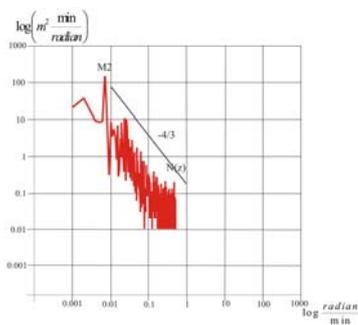


Fig. 4.27. Spectrum of internal waves (25°C isotherm) for the period of September 1-6, 2002, Mamala Bay, station B2

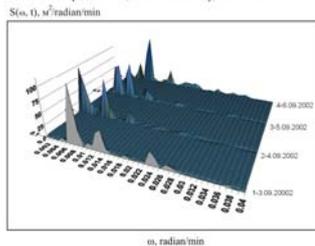


Fig. 4.28. Time-and-frequency spectra of internal waves (25°C isotherm depth) at the station B2

Рис.1 Спектры внутренних волн (рассчитанные по величинам глубины залегания изотермы 25°)

### Аннотация

Результаты эксперимента описывают главные особенности океанографических параметров в прибрежной зоне. Даны физические основы для определения антропогенного воздействия на прибрежные воды (прибрежную зону) методами дистанционного зондирования. Для обработки многоспектральных изображений, полученных с «Ikonos-2» и МКС во время

подспутниковых экспериментов, и обработки многоспектральных изображений, полученных с “Ikonos-2” были использованы различные методы, включая неконтролируемую классификацию, цветокодирование, вычисление отношений сигналов каналов и фильтрацию.

Комплексный анализ зон аномалий морского волнения с использованием пространственных спектров спутниковых изображений и аномалий приповерхностного слоя, наблюдаемых на многоспектральных изображениях и результаты подспутниковых измерений показали хорошую корреляцию. Контактные измерения полей течений, мутности, солености и биологических параметров подтвердили наличие юго-западной и юго-восточной долей в зонах распространения аномалий, обнаруженных при обработке данных дистанционного зондирования. Основные гармоники, обнаруженные в спектрах на спутниковым изображениям были также обнаружены в частотных спектрах, измеренных вблизи сбросового устройства.

Комплексный анализ космических данных, а также гидрофизических и гидробиологических данных, полученных в течение экспериментов «in situ» и пространственной спектральной обработки изображений, полученных со спутника “Ikonos-2” и архивных изображений “QuickBird” позволили определить районы поверхностных аномалий, вызванных глубинным сбросом сточных вод, и определить их форму и размер. Некоторые из аномалий имели форму бабочки, вытянутую примерно на 10 км (направление 214-224°), у которых имелись юго-восточные доли длиной в 6-7 км, распространяющиеся в направлениях 147-152° (см. рис. 2а).

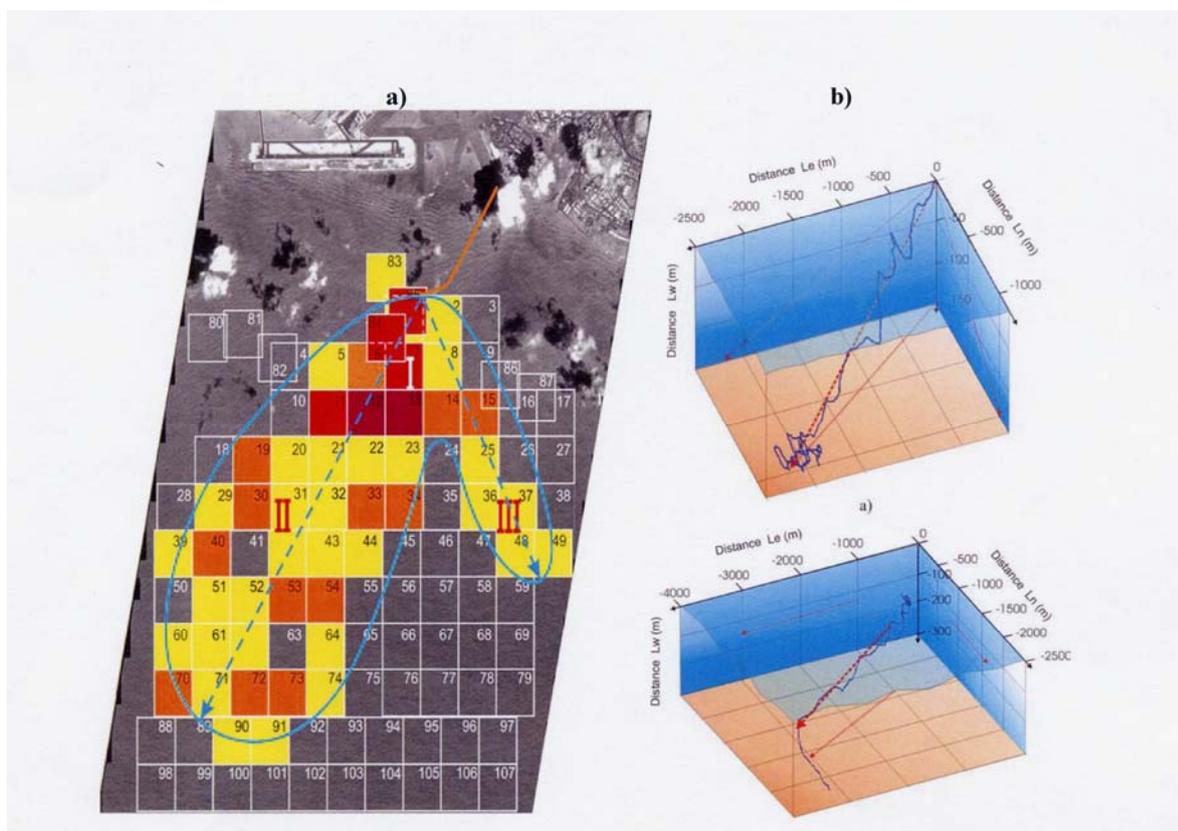


Рис. 2. а) Анализ спутниковых данных с панхроматического изображения, полученного со спутника “Ikonos-2”, с разрешением 1 м, в сентябре 2002 г. Зеленая линия – контур поля сточных вод, очерчивает область аномалий поверхностного волнения. Толстой красной линией обозначен диффузор трубопровода, идущего из Гонолулу, обозначенного красным вверху рисунка. Интенсивность аномалий проявления загрязненных вод показана цветом; б) трехмерная прогрессивно-векторная диаграмма для точки В2 вблизи

диффузора 2 и 6 сентября 2002 г.

Анализ трехмерных прогрессивно-векторных диаграмм течений (рис. 2,б) показал хорошее соответствие с данными по распространению поверхностных проявлений глубинного стока, полученному путем обработки спутниковых изображений (рис. 2 а).

*Благодарность:*

Мы благодарим наших коллег из Научно-образовательного центра «Аэрокосмос», а также М.Петрову и Р.Здоровенному, которые помогли нам провести анализ данных.

*Ссылки:*

- Бондур В.Г., Виноградов М.Е., Долотов Ю.С., Филатов Н.Н. и др. Дистанционный мониторинг антропогенных воздействий на экосистемы прибрежных акваторий (RASP). Фаза II: Дистанционные исследования космическими методами антропогенных воздействий на экосистемы прибрежных акваторий, вызванных глубинными стоками. // Москва, 2003 г., 238 с.
- Patrick K. Sullivan, Dayananda Vithanage. Ocean outfall performance as a function of density gradient variations from internal waves. Hawaii Water Environmental Association 18th Annual Conference, 1996, 11p.
- Oceanit. Groundtruthing Measurements Data Report, Honolulu, March 2003, 26 p.
- Gibson C. H., P.T. Leung, F. Wolk, and H. Prantke, 2003. Interpretative Report of Microstructure Measurements conducted at the Sand Island Outfall., UCSD, San Diego, March 103 p.p.
- Mooers C, 1973. A technique for analysis of pair complex-valued time series. *Deep-Sea Res.*, **20**: 1129-1141.
- Gonella J., 1972 A rotary-component method for analyzing meteorological and oceanographic vector time series. *Deep-Sea Res.*, **19**: 833-846.
- Рожков В.А., Белишев А.П., Клеванцов Ю.П. Векторный анализ океанских течений. Л., 1983. 264 с.
- Kondratyev K. and N. Filatov (Eds.), 1999. *Limnology and Remote sensing*. Springer-Praxis. London. 412 p.
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В. Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исследование Земли из космоса, 2001, № 6, с. 49-67. 2001.