

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

УДК 528.88: 551:[502.330.15] (9-929.9)

**ВЫДЕЛЕНИЕ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ
ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРХНЕГО СЛОЯ ОКЕАНА
ПО МНОГОЗОНАЛЬНЫМ СПУТНИКОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ
ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ.
ЧАСТЬ 1. ЭФФЕКТЫ СБРОСА ДРЕНАЖНЫХ КАНАЛОВ
В ПРИБРЕЖНЫЕ АКВАТОРИИ**

© 2005 г. В. Г. Бондур*, Е. В. Зубков

Научный центр проблем аэрокосмического мониторинга "Аэрокосмос", г. Москва

*Тел.: (095)632-16-54, 632-17-19, vgbondur@online.ru

Поступила в редакцию 04.02.2005 г.

Приводятся результаты обработки многозональных космических изображений поверхности океана, полученных со спутника "Ikonos" для исследования мелкомасштабных оптических неоднородностей прибрежных акваторий. Аппаратура спутника обеспечивает пространственное разрешение 4 м в полосе обзора ~11 км при амплитудном разрешении 11 бит/пиксел в различных спектральных каналах: *B* (450–520) нм, *G* (520–600) нм, *R* (630–690) нм, *NIR* (760–900) нм. Применена методика обработки, основанная на использовании характеристик относительной изменчивости сигналов в спектральных каналах *R*, *G*, *B* шириной 60–80 нм. Выявлены слабоконтрастные неоднородности гидрооптических характеристик верхнего слоя океана малых пространственных масштабов - от нескольких метров до нескольких километров, которые обусловлены стоками дренажных каналов в районе г. Гонолулу.

ВВЕДЕНИЕ

Для современной океанологии характерно интенсивное развитие аэрокосмических методов и средств изучения различных процессов и явлений, происходящих в морях и океанах [1–9].

На ранних этапах развития космической океанологии изучалась преимущественно глобальная, макро- и мезомасштабная пространственная изменчивость характеристик водной среды, что объяснялось, в первую очередь, невысоким разрешением используемой аппаратуры (пространственным, спектральным, амплитудным). С появлением нового поколения космических приборов дистанционного зондирования (ДЗ) стала доступна мелкомасштабная область характеристик морской среды, изучение которой до настоящего времени оставалось на периферии дистанционных исследований океана.

Современная космическая аппаратура ДЗ обладает пространственным разрешением порядка единиц метров и выше, амплитудным разрешением - 11 бит/пиксел и спектральным разрешением до единиц нанометров (при числе каналов до нескольких сотен) [1, 6, 9]. Благодаря новому семейству космических аппаратов (типа "Ikonos", QuickBird и др. [1]) представилась возможность исследования пространственных распределений мелкомасштабных структур гидрооптических не-

однородностей верхнего слоя океана и сравнительного анализа локальных областей водной среды, значительно разнесенных в пространстве. Получение подобных мгновенных "площадных" распределений характеристик океана в принципе не обеспечивается, существующими судовыми измерениями.

В то же время локальная мелкомасштабная динамика верхнего слоя океана и, в особенности, области термоклина уже давно стала предметом детальных исследований с помощью судовых методов [10]. Получение вертикальных разрезов распределений тех или иных характеристик морской среды с помощью погружаемых или буксируемых датчиков является рутинной океанологической процедурой, которой присущи такие недостатки, как инерционность измерений и большая горизонтально-пространственная дискретность измерений. Эти же недостатки присущи и судовым лидарным средствам несмотря на их безинерционность и возможность невозмущающего контроля [11]. В связи с этим на современном этапе развития океанологии возрастает потребность использования новых подходов к получению и анализу космической информации [1].

В настоящей статье представлены результаты исследований слабоконтрастных неоднородностей гидрооптических характеристик, вызванных дренажными стоками. Результаты получены на

основании данных космической съемки с высоким пространственным и амплитудным разрешением. Исследования проводились в прибрежной зоне о-ва Оаху (Гавайи, США) в период 2000-2004 гг.

**ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
МНОГОСПЕКТРАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
МЕЛКОМАСШТАБНЫХ
НЕОДНОРОДНОСТЕЙ
ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОКЕАНА**

Для эффективного применения космических методов и средств ДЗ океана важно использовать адекватные методы обработки полученных данных. Известны различные подходы к обработке и анализу спутниковых изображений океана. Многоспектральная и гиперспектральная космические съемки с высоким и средним пространственным разрешением (при условии проведения синхронных подспутниковых контактных измерений) позволяют определить абсолютные значения ряда характеристик морской среды по измерениям цвета океана (отраженного излучения в узких спектральных интервалах) [1, 5-9] и в дальнейшем выполнить анализ пространственно-временной изменчивости этих характеристик. При этом для повышения точности требуется корректный учет влияния атмосферы, который производится расчетными методами на основе различных теоретических моделей, и результаты коррекции по определению содержат погрешности таких моделей (см. например, [7, 8]).

Опыт восстановления абсолютных значений параметров морской среды показывает, что расчетные соотношения, связывающие их с характеристиками сигналов обратно рассеянного излучения, справедливы не для всех типов морских вод [5, 10] и вносят большие погрешности применительно к водам шельфа, где велики концентрации взвеси и растворенных примесей [1, 5, 9, 12, 13]

Другой подход, не связанный с измерением абсолютных величин параметров морской среды и ориентированный, в большей степени, на выявление различных динамических процессов в океане, основан на использовании характеристик относительной изменчивости сигналов обратного рассеяния в различных участках спектра электромагнитных волн. В качестве такой характеристики может быть использован индекс цвета [12]

$$I_{\text{ц}} = B(450) / B(520), \quad (1)$$

где $B(450)$ и $B(520)$ – яркости восходящего из морской среды излучения на длинах волн 450 и 520 нм при наблюдении в надир.

Индекс цвета получил распространение как самостоятельная характеристика, используемая для представления результатов исследований

океана и их интерпретации на качественном уровне [10].

Этот индекс чувствителен к множеству факторов, определяющих состояние морской среды. Так, яркость в коротковолновом участке спектра видимого излучения (синяя область) зависит от концентрации хлорофилла, состава и концентрации растворенных органических веществ, в то время как яркость в зеленой области спектра в большей степени определяется составом, концентрацией и распределением частиц взвеси по размерам.

Можно предложить и другие варианты индекса цвета с использованием иных участков спектра. Очевидно, что смысловая нагрузка индекса в каждом конкретном случае будет зависеть от сочетания длин волн. Так, например, если взять

$$I'_{\text{ц}} = B(520) / B(690), \quad (2)$$

то в этом случае яркость в красном участке спектра определяется, в основном, составом и концентрацией взвеси в тонком подповерхностном слое морской среды.

Расширенные понятия индекса цвета использованы нами в методику обработки и представления данных многоспектральной космической съемки высокого разрешения на основе характеристик относительной изменчивости спектральных сигналов изображений — "широкополосных" индексов цвета. При обработке и анализе изображений поверхности океана, полученных со спутника "Ikonos", такие "широкополосные" индексы цвета можно представить в виде

$$\begin{aligned} & B(450-520)/G(520-600); \\ & B(450-520)/R(600-690); \\ & G(520-600)/R(600-690). \end{aligned} \quad (3)$$

Двумерные распределения данных величин (по поверхности океана) использовались для создания цветокодированных изображений и синтезированных цветовых образов в трехмерном пространстве "широкополосных" индексов цвета.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ
ВЫДЕЛЕНИЯ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ
ОПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ
ПО СИГНАЛАМ ШИРОКОПОЛОСНЫХ
СПЕКТРАЛЬНЫХ КАНАЛОВ**

Поток солнечного излучения, достигающий океана, преломляясь на случайных элементах его взволнованной поверхности и частично отражаясь от них, распространяется в морской среде, испытывая поглощение и рассеяние. Обратное рассеянное излучение, выходящее из морской среды, обладает ярко выраженной спектральной зависимостью, которая определяется не только избира-

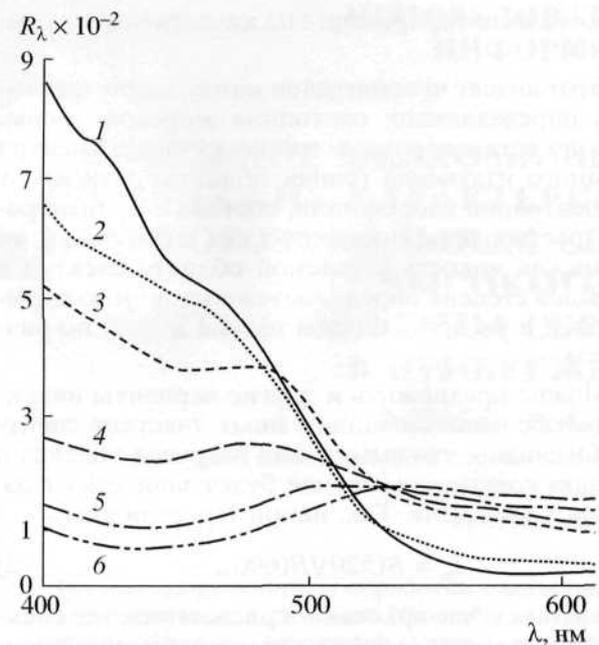


Рис. 1. Усредненные спектральные зависимости коэффициента отражения морской среды R_λ для различных значений индекса типа вод m [15]: 1 - $m = 1.17-1.35$; 2 - $m = 1.5-1.6$; 3 - $m = 2.0-2.5$; 4 - $m = 2.9-3.7$; 5 - $m = 5.8-6.4$; 6 - $m = 8.8-10.5$.

тельным ослаблением в чистой морской воде, но, в значительной степени, наличием примесей взвешенных и растворенных веществ органического и неорганического происхождения [10, 12].

Вариации состава и концентрации растворенных веществ определяют изменчивость поглощения излучения, в то время как взвешенные частицы в зависимости от их концентрации, распределения по размерам и происхождения (минеральные, органические) влияют, преимущественно, на характеристики рассеяния.

Объемные распределения примесей объективно отражают многообразие физических, в том числе и гидродинамических, процессов, развивающихся в водной среде. В свою очередь, неоднородности распределений этих примесей проявляются в пространственной изменчивости спектрального состава обратного рассеянного излучения. Для оценки величины этого излучения обычно используется понятие восходящей освещенности $E_{\uparrow\lambda}(z)$, связанное с нисходящей освещенностью $E_{\downarrow\lambda}(z)$ через коэффициент диффузного отражения R_λ [10, 12]:

$$E_{\uparrow\lambda}(z) = E_{\downarrow\lambda}(z) R_\lambda, \quad (4)$$

где z - глубина.

Яркость поверхности океана в данной точке определяется величиной восходящей освещенности и диффузным коэффициентом яркости морской поверхности p_λ . Коэффициенты R_λ и p_λ тесно связаны [11], хотя p_λ , в отличие от R_λ , учитывает угло-

вое распределение восходящего излучения. Коэффициент диффузного отражения морской среды R_λ в данной точке слабо меняется с глубиной, если эта среда не отличается сильной неоднородностью [10]. В то же время спектральная зависимость $R(\lambda)$ обнаруживает сильную изменчивость в зависимости от типа вод.

Обобщение многочисленных данных измерений спектральных характеристик показателя ослабления водной среды

$$\alpha_{\downarrow\lambda}(z) = -\partial / \partial z \cdot \ln E_{\downarrow\lambda}(z) \quad (5)$$

показало, что существует определенная статистическая связь между величиной $\alpha_1(\lambda)$ в центральной области спектра и типом спектральной характеристики [10, 12, 13]. Ступенчатая классификация вод по типам наиболее характерных спектральных зависимостей была предложена в [12]. С другой стороны, авторами [13] была предложена непрерывная классификация с помощью введенного ими понятия оптического индекса типа вод [10, 13]:

$$m = 100 \cdot \alpha_{\downarrow\lambda=500} \quad (6)$$

По конкретному значению такого индекса возможно в определенном доверительном интервале восстановить спектральные характеристики $\alpha_{\downarrow\lambda}(\lambda)$, $R(\lambda)$. Это связано с тем, что абсолютные величины коэффициентов диффузного отражения R_λ , и типы их спектральных зависимостей в верхнем слое океана (ВСО) при высоком Солнце ($h_\odot \geq 45^\circ$) обнаруживают значительную корреляцию со значениями $\alpha_{\downarrow\lambda=500}$. В то же время экспериментально установлено, что величины слабо зависят от высоты Солнца и определяются, в основном, свойствами морской среды [10].

На рис. 1, взятом из монографии [10], представлены экспериментально полученные усредненные зависимости $R_m(\lambda)$ при различных значениях оптического индекса типа вод m . На рис. 2 приведена рассчитанная на основании данных, приведенных на рис. 1, зависимость отношения "интегральных" коэффициентов диффузного отражения применительно к широкополосным спектральным каналам аппаратуры "Ikonos". Величины этих коэффициентов брались в синем и зеленом каналах в зависимости от оптического индекса типа вод (m):

$$\xi_{BG}(m) = \int_{450}^{520} R_m(\lambda) d\lambda / \int_{520}^{600} R_m(\lambda) d\lambda. \quad (7)$$

Как следует из рис. 2, в широких полосах каналов многоспектрального изображения сглаживаются особенности (локальные максимумы) усредненных кривых $R_m(\lambda)$. Чувствительность к пространственной спектральной изменчивости "интегрального" индекса цвета в широкополос-

ных каналах космической многоспектральной аппаратуры будет ниже по сравнению с индексом, измеряемым в более узких спектральных интервалах. Однако величины отношений, “накопленных” по спектру откликов, будут выше.

Для интерпретации результатов обработки мы использовали как синтезированные цветовые образы в трехмерном пространстве “интегральных” индексов цвета (3), представленных в виде

$$\begin{aligned} \xi_{BGi} &= (A_B / A_G)_i \\ \xi_{BRi} &= (A_B / A_R)_i \\ \xi_{GRi} &= (A_G / A_R)_i, \end{aligned} \quad (8)$$

где A_R, A_G, A_B - амплитуды сигналов i -го пикселя в R, G, B-каналах космического изображения, так и цветокодированные представления распределений $\xi_{BG}(x,y), \xi_{BR}(x,y), \xi_{GR}(x,y)$, где x,y - координаты точек изображения.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ОСОБЕННОСТИ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

В настоящей работе исследуются неоднородности гидрооптических характеристик прибрежной зоны о-ва Оаху (Гавайи, США). Для него характерно значительное количество дренажных каналов, имеющих выход в прибрежные акватории и являющихся источниками локальных мезо- и мелкомасштабных неоднородностей поля гидрооптических характеристик. При проведении исследований прибрежной зоны о-ва Оаху использовались космические изображения, полученные аппаратурой MSI спутника “Ikonos” в период с 2000 по 2004 г.

Все использованные в настоящей работе космические изображения были получены при углах возвышения Солнца $Z_0 > 69^\circ$ и в диапазоне углов визирования от 60° до 80° . При этом условия наблюдения оптических неоднородностей зависели, преимущественно, от характеристик морской среды и, в меньшей степени, от геометрии эксперимента. Это обусловлено тем, что в интервале углов возвышения Солнца $Z_0 = 15^\circ-69^\circ$ величина коэффициента диффузного отражения R_λ меняется не более чем в 1.5 раза, в то время как от типа вод разброс значений R_λ - на порядок выше [10].

При выполнении обработки в ряде случаев возникала необходимость предварительной коррекции космических изображений. Для этого осуществлялось:

- удаление вертикальных дефектных полос (шириной порядка десятка пикселей по строке);

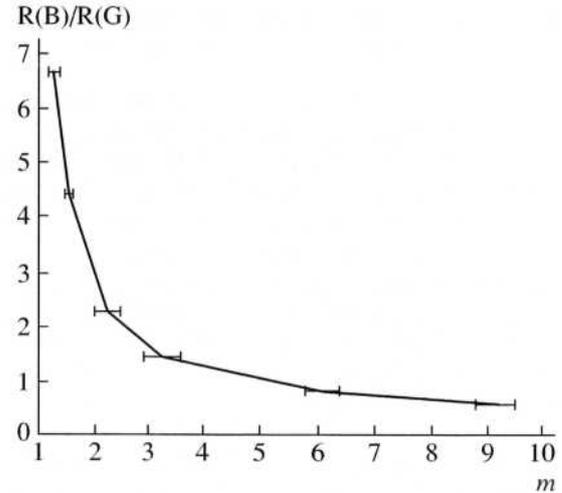


Рис. 2. Рассчитанная на основании рис. 1 зависимость усредненных (в полосах каналов аппаратуры “Ikonos”) отношений $R(B)/R(G)$ коэффициентов яркости морской среды от индекса типа вод m .

- выравнивание средней яркости широких (>1/3 строки) вертикальных полос;
- маскирование участков облачного покрова и берега.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗ

На рис. 3 приведены результаты обработки изображения северо-восточного участка прибрежной зоны о-ва Оаху у мыса Мокапу Пойнт (съемка от 21 октября 2000 г.) в виде синтезированного цветового образа в пространстве “интегральных” индексов цвета (8) после декорреляционного растяжения исходного кадра (каналы R,G,B). В левой нижней части рисунка отчетливо видно спрямленное русло канала Кавануи выходящего в бухту Каилуа.

В нижней части рис. 3 выделен фрагмент размером $\sim 7.5 \times 2 \text{ км}^2$ с маскированными участками берега и облаков. Изображение фрагмента представляет собой синтезированный цветовой образ, полученный в результате наложения изображения морской поверхности и продукта обработки того же участка с целью выделения аномалий гидрооптических характеристик. На этом фрагменте отчетливо видна струя сброса дренажного канала в бухте Каилуа. Менее плотная относительно окружающих соленых вод океана пресная струя, всплывая, меандрирует на неоднородностях плотности с пространственным периодом около 500 м (в плане). На расстоянии $\sim 1.5-5 \text{ км}$ от берега она образует область повышенных значений отношения канальных сигналов B/G шириной $\sim 1-1.5 \text{ км}$, вытянутую вдоль берега. Правее этой области, на удалении от берега отчетливо выявляется “пятнистая”, неравномерная картина мел-



Рис.3. Синтезированный цветовой образ акватории бухта Каилуа – мыс Мокапу Пойнт в пространстве “интегральных” индексов цвета. Фрагмент $7.5 \times 2 \text{ км}^2$ в нижней части рисунка – суперпозиция выделенных структур поверхностного волнения и стока канала Кавануи.

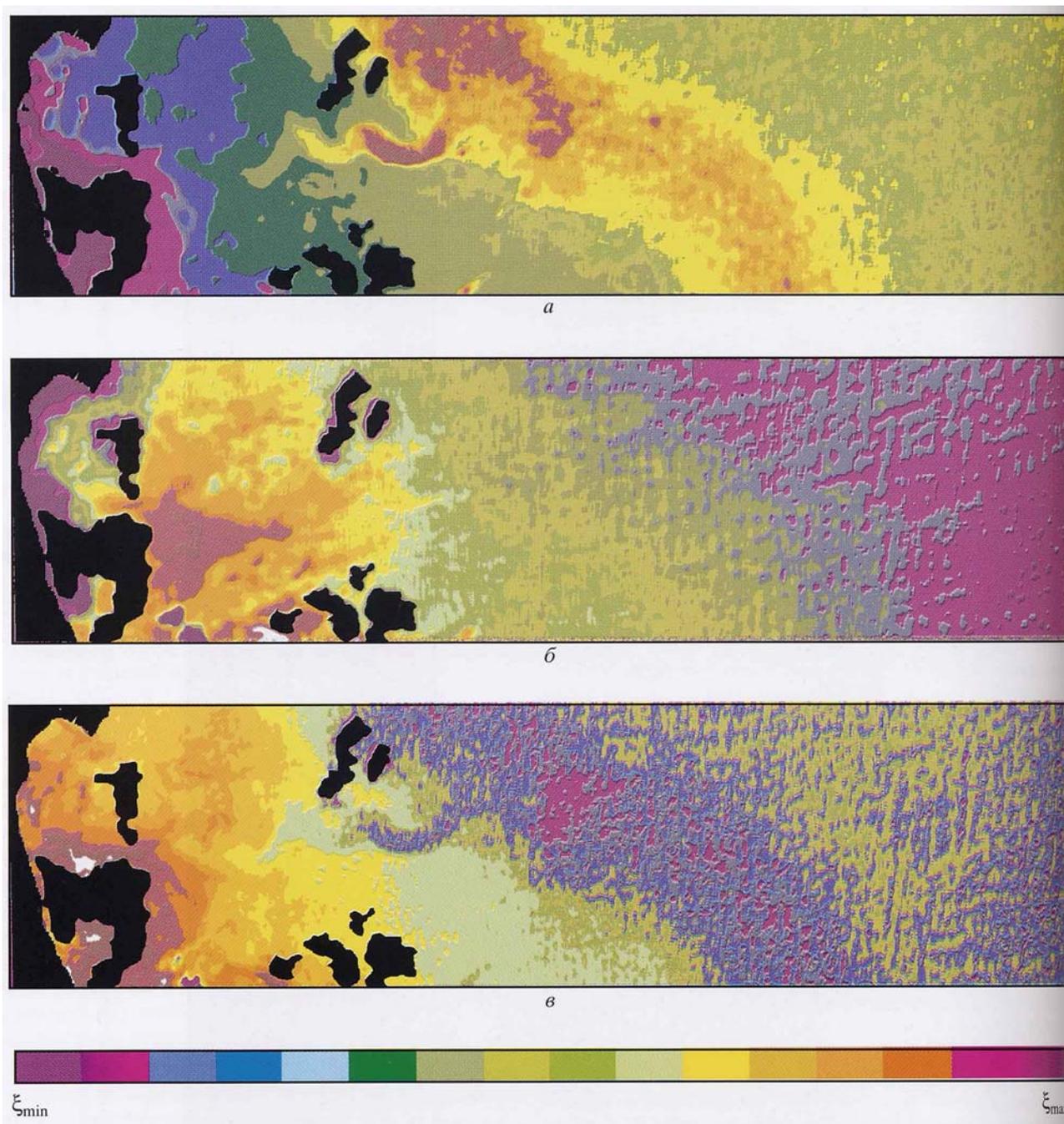
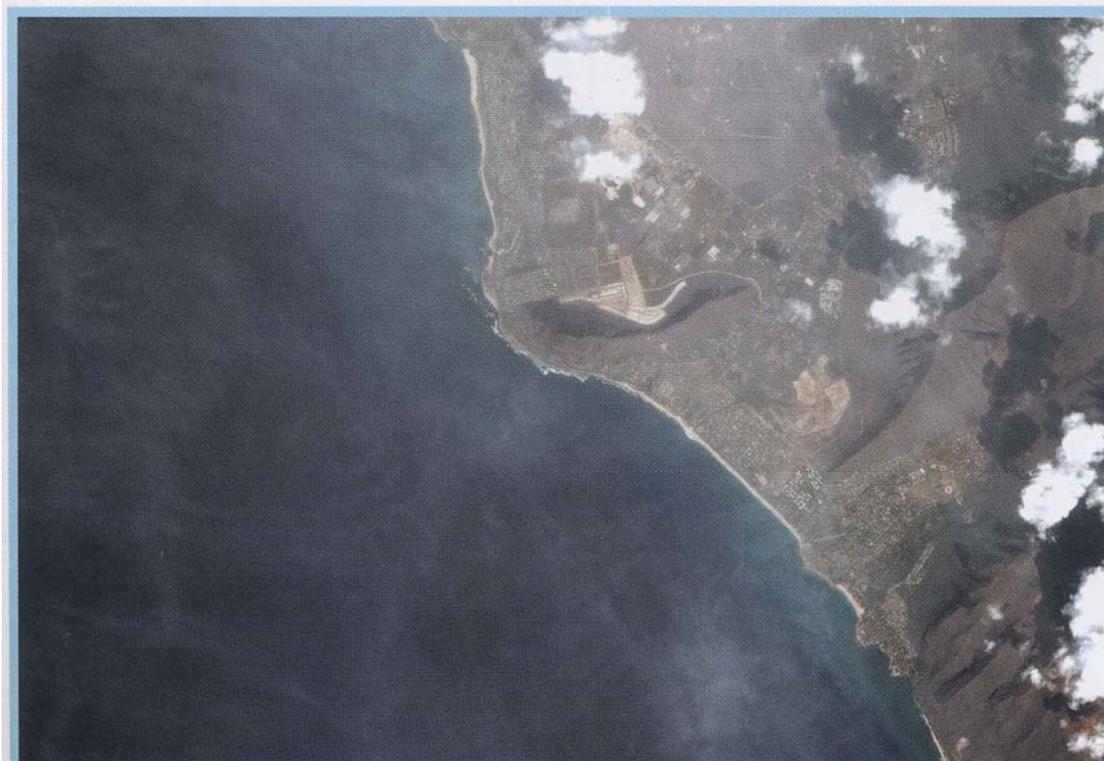


Рис.4. Цветокодированные изображения распределений отношений канальных сигналов (“интегральных” индексов цвета) в выделенном фрагменте рис.3, отношение канальных сигналов: $a - \xi = B/G$; $б - \xi = B/R$; $в - \xi = G/R$



a



b

Рис.5. Исходные изображения (синтез каналов R,G,B) западного побережья о-ва Оаху (р-н Вайанае-Маили), полученные со спутника "Ikonos", съемка: *a* – 2 марта 2000 г.; *b* – 12 апреля 2000 г.

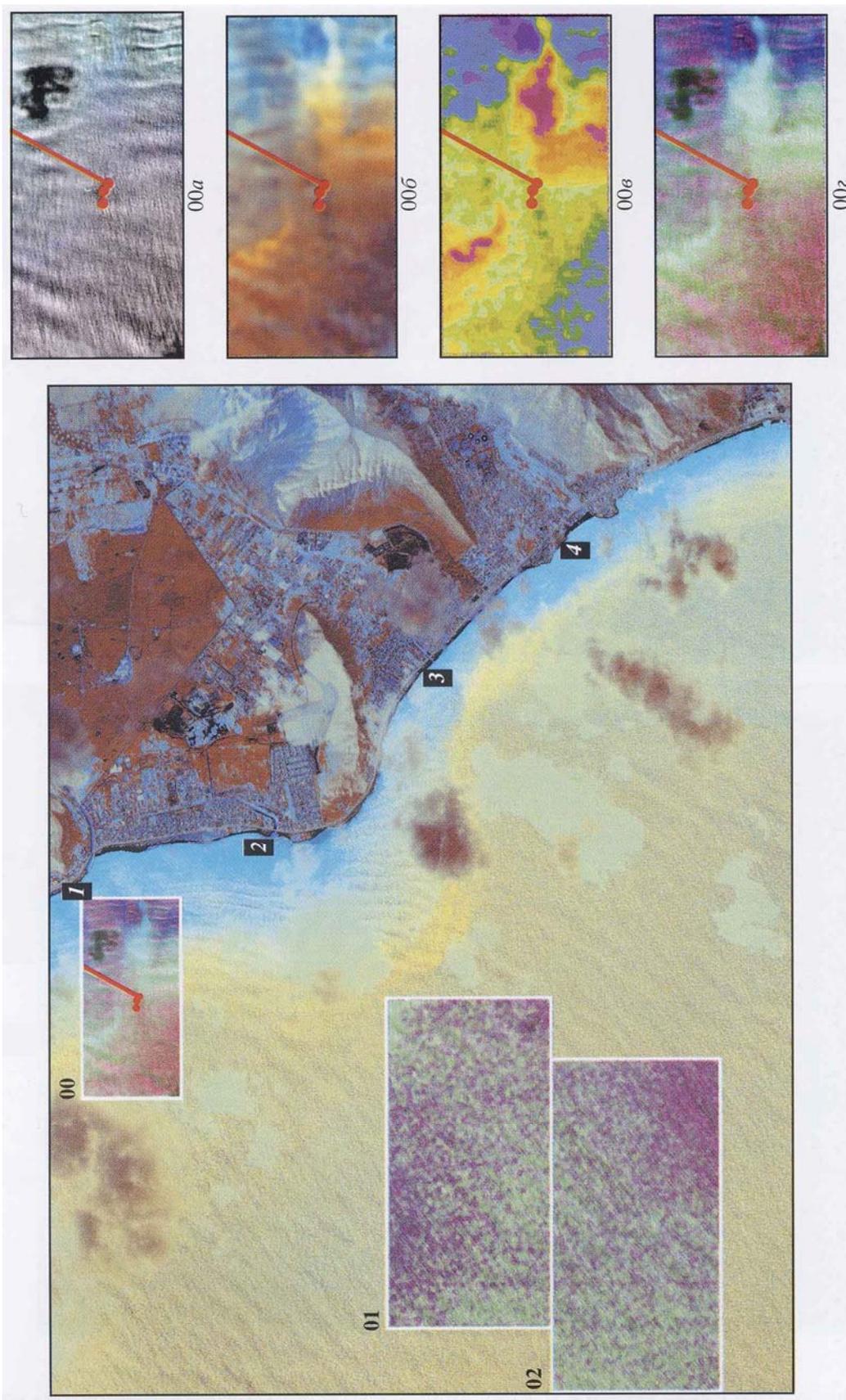


Рис.6. Результаты обработки изображения западного побережья о-ва Оаху (Вайанае-Маили), полученного со спутника "Копос" 2 марта 2000 г.: 00,01,02 – выделенные фрагменты; 00а – исходное изображение фрагмента 00; 00б – результат обработки после медианной фильтрации; 00в – цветокодированное распределение отношений канальных сигналов В/С; 00г – результат наложения выделенных неоднородностей на структуру поверхностного волнения; 1-3 – устья каналов; 4 – речное устье.

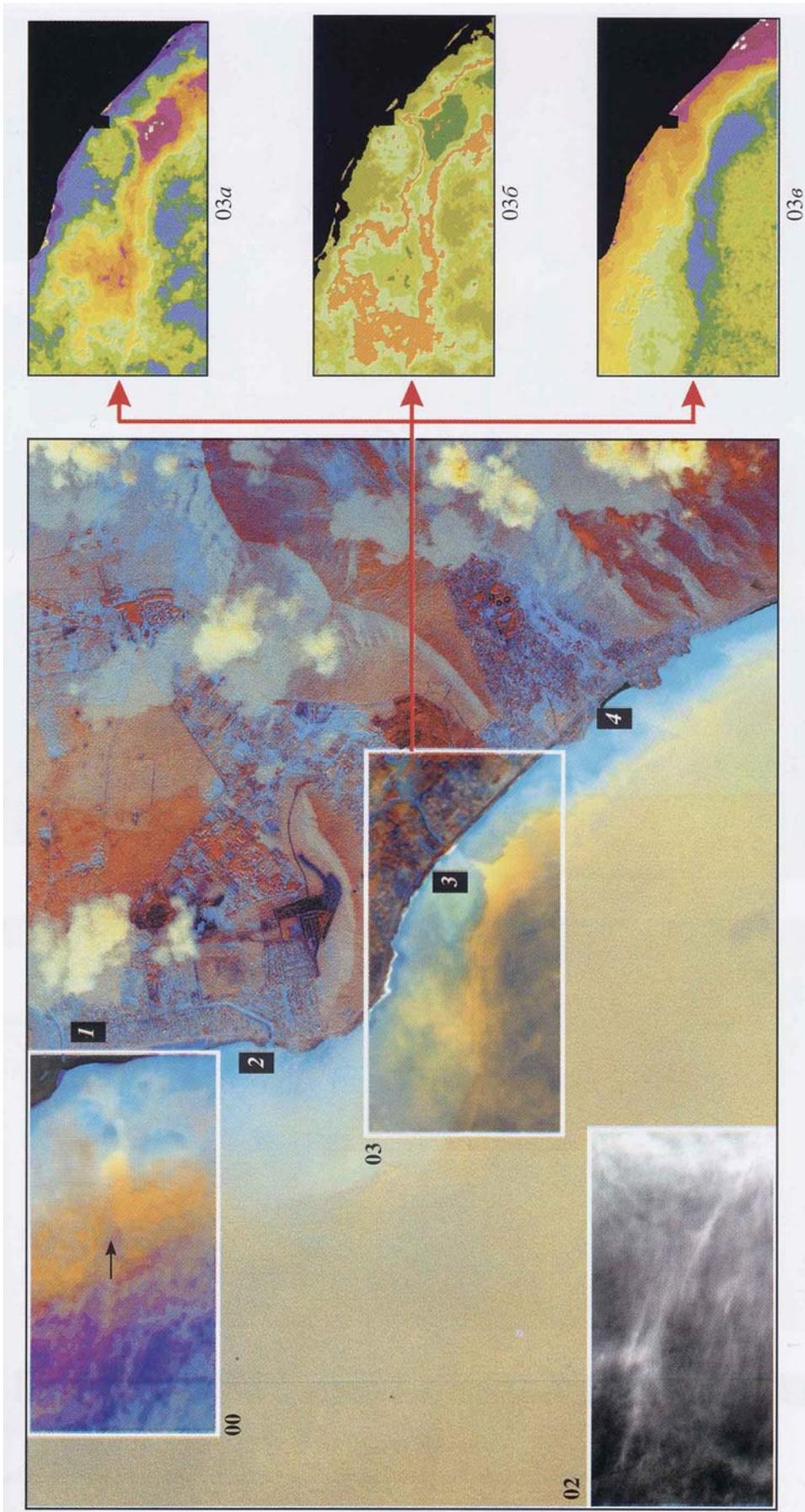


Рис.7. Результаты обработки изображения спутника "Копос", полученного 12 апреля 2000 г. у западного побережья о-ва Оаху (Вайанае-Маили): индексы 1-4 – см рис.6, 00,02,03 – выделенные фрагменты. Цветокодированные распределения отношений (ξ) канальных сигналов: 03а - В/С; 03б - G/R.

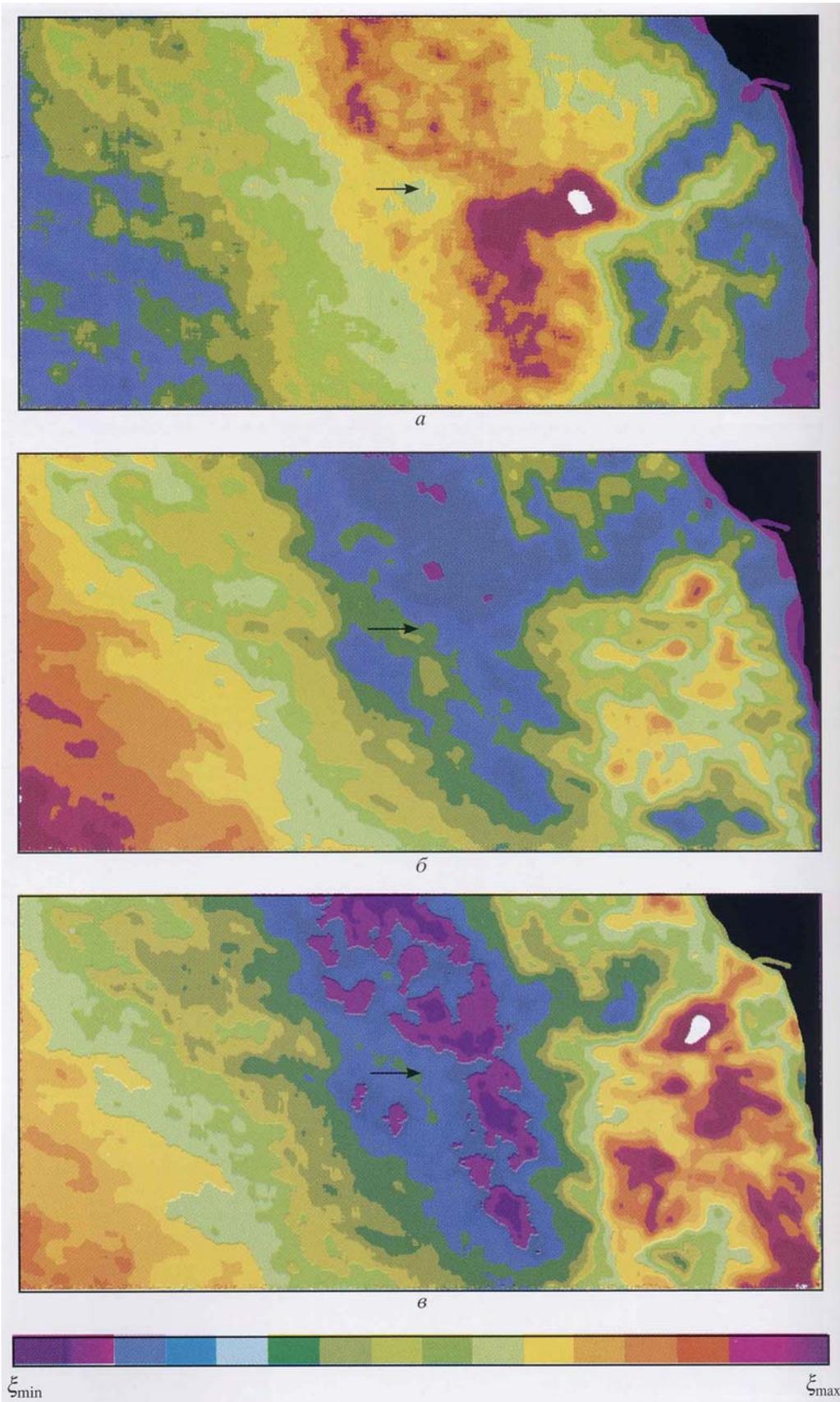


Рис.8. Результаты обработки фрагмента 00 рис.7. Цветокодированные распределения отношений канальных сигналов: $a - \xi = B/G$; $б - \xi = B/R$; $в - \xi = G/R$.

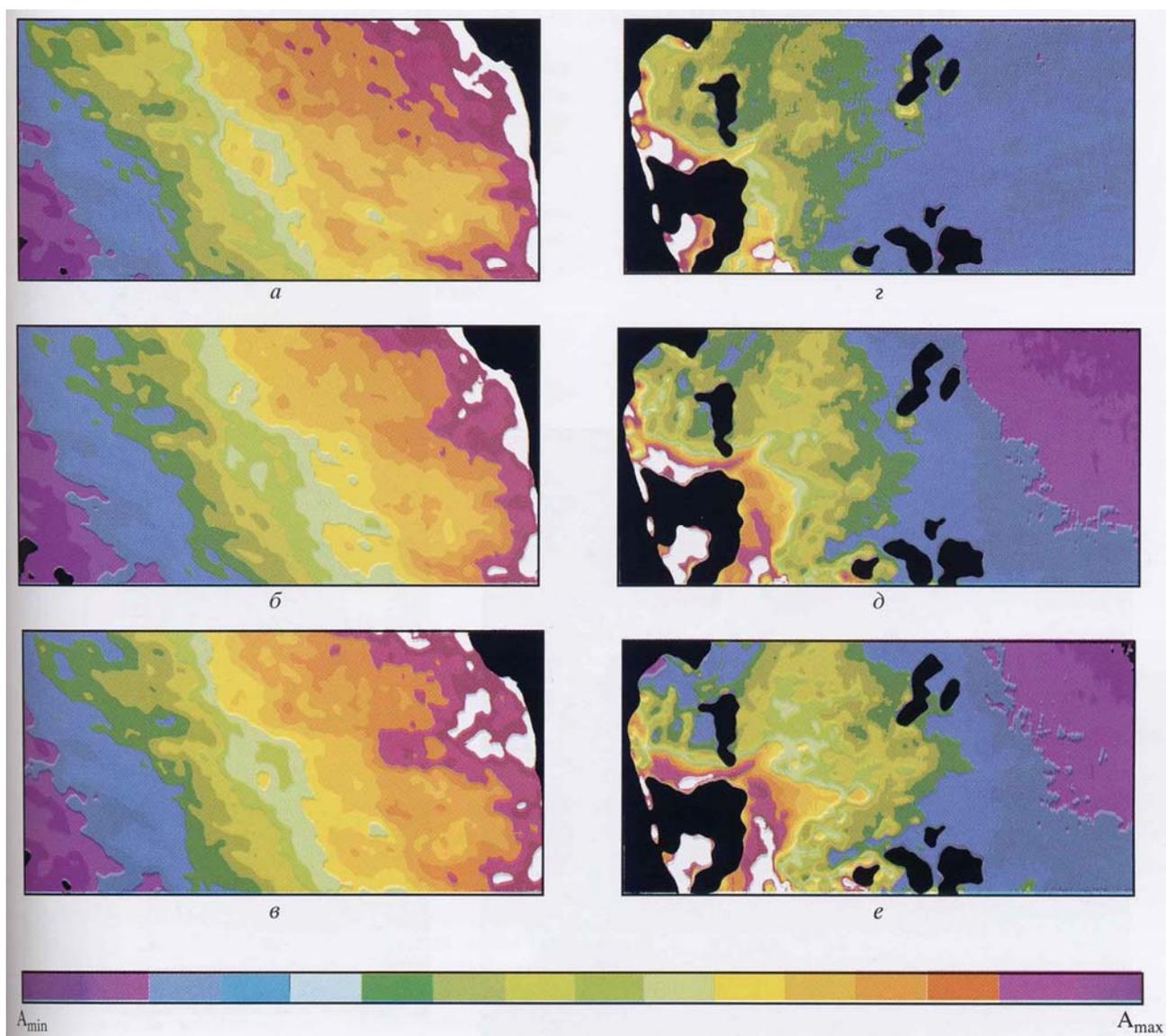


Рис.9. Сопоставление цветокодированных распределений исходных канальных сигналов (A_R, A_G, A_B) изображений спутника "Ikonos": *а, з* - красный R; *б, д* - зеленый G; *в, е* - синий канал B; *а-в* фрагмент 00 рис.7 (коллектор Вайанае); *з-е* рис. 4 (канал Кавануи, бухта Каилуа).

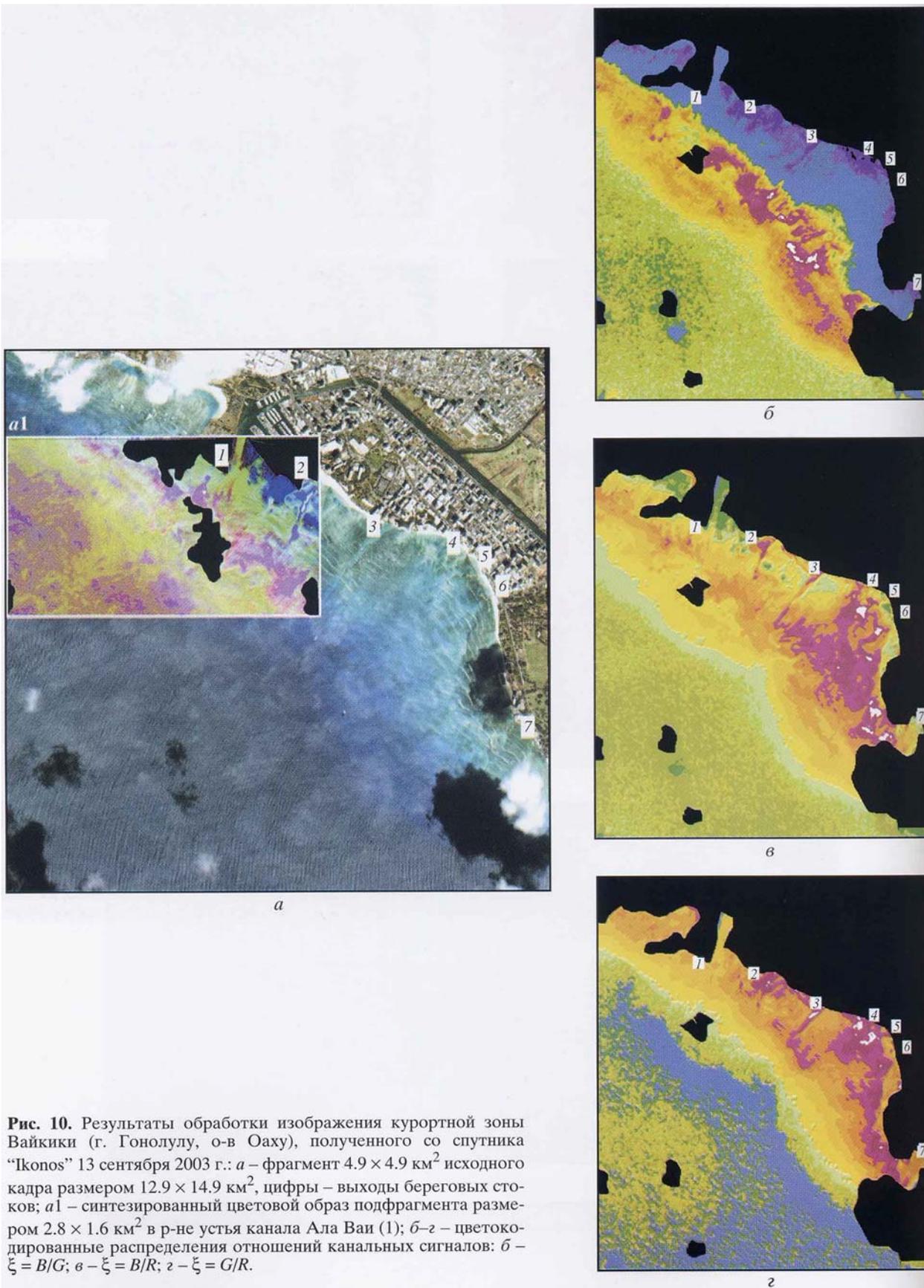


Рис. 10. Результаты обработки изображения курортной зоны Вайкики (г. Гонолулу, о-в Оаху), полученного со спутника "Ikonos" 13 сентября 2003 г.: *a* – фрагмент $4.9 \times 4.9 \text{ км}^2$ исходного кадра размером $12.9 \times 14.9 \text{ км}^2$, цифры – выходы береговых стоков; *a1* – синтезированный цветовой образ подфрагмента размером $2.8 \times 1.6 \text{ км}^2$ в р-не устья канала Ала Ваи (1); *б-г* – цветокодированные распределения отношений канальных сигналов: *б* – $\xi = B/G$; *в* – $\xi = B/R$; *г* – $\xi = G/R$.

комасштабных оптических неоднородностей в невозмущенной “чистой” области океана.

На рис. 4 приведены цветокодированные представления пространственных распределений канальных отношений сигналов B/G (рис. 4а), B/R (рис. 4б), G/R (рис. 4в) “интегральных” индексов цвета (8), соответствующие выделенному фрагменту рис. 3. Палитра цветокодирования приведена в нижней части рисунка. Изменению цвета палитры в направлении слева направо соответствует рост величины индекса цвета. Такие распределения дают наглядную картину оптических неоднородностей в верхнем слое океана, но, как и всякие относительные характеристики, допускают неоднозначную интерпретацию физического состояния морской среды. Применительно к изображениям спутника “Ikonos” следует также принимать во внимание широкие (60-80 нм) спектральные полосы каналов. Как следует из рис. 2, отношения сигналов широкополосных каналов описываются монотонными функциями, не отражающими наличие локальных максимумов спектральных характеристик для различных индексов типа вод (рис.1).

В левой части рис. 4а (отношение каналов B/G) проявляется эффект, обусловленный, как мы полагаем, двумя процессами: выносом в стоке канала растворенных органических веществ (РОВ) и взвеси. У берега видна обширная зона минимальных значений сигнала (цвет: лиловый, фиолетовый, синий) в области выноса вод дренажного канала. Минимальные значения отношения (B/G), по-видимому, связаны с высоким уровнем сигнала в канале G за счет рассеяния на взвеси, выносимой в стоках канала. При этом в непосредственной близости от берега относительный вклад синего канала существенно меньше. Концентрация взвеси по мере удаления от берега постепенно снижается за счет гравитационного осаждения. Более мелкие фракции взвеси оседают медленнее и распространяются по акватории бухты (область малых значений B/G в левой части рис. 4а и больших значений G/R на рис. 4в). Концентрация органики (взвешенной и растворенной) наиболее высока у берега в близосевой области потока (левая часть рис. 4б).

В области аномально высоких значений B/G (средняя часть рисунка 4а), у внешней кромки полосы прибрежных рифов и отмелей, по-видимому, имеет место интенсивное развитие фито- и зоопланктона как за счет выноса РОВ, так и за счет локального подъема более глубоких океанических вод, обогащенных биогенными элементами. Наличие такой зоны, тянущейся вдоль берега, отмечается и на других изображениях, полученных со спутника “Ikonos”. Эта область характерна ростом сигнала не только в канале B , но и в кана-

ле R , в желтом участке спектра, (рис. 4в) на фоне снижающейся концентрации взвеси (канал G).

В средней части рис. 4б, соответствующей аномальной области, характер изменения сигналов B и R уравнивается – аномалия не проявляется, в отличие от левой части этого же рисунка, где преобладает органика, выносимая стоком, но еще не наблюдается заметного развития фито- и зоопланктона.

На рис. 5 представлены исходные изображения, полученные со спутника “Ikonos” 2 марта 2000 г. (рис. 5а) и 12 апреля 2000 г. (рис. 5б) на западном побережье острова Оаху в районе Вайанае-Маили. Расхождение координат крайних точек побережья в двух изображениях составляет не более 10 угл. сек.

Анализ приведенных изображений показывает, что, если на апрельском кадре (рис. 5б) над поверхностью океана присутствует облачная дымка и структура волнения не просматривается, то изображение, полученное в марте 2000 г. (рис. 5а), отличается прозрачностью атмосферы, наличием облаков над океаном и развитой структурой поверхностного волнения, складывающейся из крупной океанской зыби, набегающей с северо-запада, и ветрового волнения близкого направления.

На рисунках рис. 6 и 7 представлены основные результаты обработки изображений, приведенных на рис. 5а и рис. 5б соответственно. На изображениях помечены цифровыми индексами устья реки (4) и трех дренажных каналов (1-3). При обработке из полных кадров были выделены фрагменты №№ 00, 01, 02, 03. Фрагменты 01, 02 и 03 имеют размеры 1000×500 пикселей (4×2 км²); фрагмент 00 на рис.6 меньшего размера – 600×300 пикселей (2.4×1.2 км²), что связано с наличием облачности в этой части акватории. Рисунки 6 и 7 содержат синтезированные цветовые образы как исходных изображений после предварительной обработки, так и результатов обработки выделенных фрагментов. Следует отметить, что совокупности операций обработки фрагментов, соответствующих дренажным каналам 1 и 3, различны.

Практически на широте устья канала 1, на расстоянии около мили от берега, располагается выходящий диффузор подводного коллектора Вайанае для сброса очищенных стоков. Его положение обозначено на фрагментах рис. 6 красной ломаной линией, а на рис. 7 и 8 - черными стрелками. Мелкомасштабные аномалии морской среды, вызываемые стоками подводных коллекторов, будут подробно рассмотрены во второй части статьи. В данном случае сток коллектора Вайанае упоминается в связи с тем, что его выходящий диффузор расположен в области распространения дренажного стока канала 1 и их взаим-

ное влияние обнаруживается в результатах обработки фрагмента 00 на рис. 6.

В правой части рис. 6 приведены увеличенные изображения фрагмента 00(*a-z*), соответствующие различным этапам обработки. В поле полного кадра (рис. 6), помещено изображение 00г обработанного фрагмента 00, а его исходное изображение приведено на рис. 6 (00а). В его правом верхнем углу присутствует облачная тень. Длина волны мощной океанской зыби, отчетливо видимой на этом фрагменте, по мере приближения к берегу уменьшается от ~220-230 м в левой части фрагмента до ~120-130 м - в правой его части.

Изображение 00б на рис. 6 представляет синтезированный цветовой образ фрагмента 00а после медианной фильтрации. В правой части фрагмента 00б отчетливо виден сток дренажного канала и простирающаяся к югу область распространения этого стока. К северо-западу от места расположения выходного диффузора коллектора Вайанае (приблизительно на расстоянии 240 м) выделяется основание всплывающей струи, которая, предположительно, является продолжением дренажного стока, деформируемого выходным потоком подводного коллектора.

Как и в рассмотренном ранее случае (рис. 3 и рис. 4а-в), на рис. 6 в зоне стока дренажного канала наблюдается меандрирование струи (пространственный период около 320 м). Обращает на себя внимание близость оценок пространственного периода зыби в середине фрагмента и пространственного периода меандрирования струи. Более отчетливо струя видна на фрагменте 00в (рис.6), представляющем собой цветокодированное распределение отношения канальных сигналов B/G .

На фрагменте 00г (рис. 6), по аналогии с рис.3а, представлен результат наложения выделенных неоднородностей на структуру волнения. Аналогичные результаты суперпозиции представлены в левой нижней части рис. 6 (выделенные фрагменты 01 и 02). На этих фрагментах видна "пятнистая" структура оптических неоднородностей невозмущенной морской среды сходная с наблюдаемой в правой части рис. 3а.

В другом кадре (рис. 5б), полученном несколько недель спустя (12 апреля 2000 г.), проявляется дымка, видимая на необработанном фрагменте 02 (рис. 7). Однако участок акватории, прилегающий к устью канала 3 (рис. 5б), был свободен от дымки и облаков. Это позволило выделить аномальную область распространения стока в изображении фрагмента 03 (рис. 7) на этапе медианной фильтрации исходного фрагмента. На обработанном фрагменте видно, что сток распространяется, в основном, вдоль границы прибрежных рифов и отмелей. В правой части рис. 7 на трех фрагментах (03а, 03б и 03в) приведены цветокодированные распределения "интегральных" индексов цвета B/G , B/R

G/R , соответственно. Общий характер представленных распределений во многом схож с данными, приведенными на рис. 4 (*a-в*) для канала Кавануи на востоке о. Оаху.

Подобная картина наблюдается и на рис. 8 (*a-в*), где представлены результаты обработки фрагмента 00 рис. 7 – цветокодированные распределения (8): B/G – а, B/R – б и G/R – в. Участки берега в правых верхних углах фрагментов закрыты маской, на краю которой показано положение устья канала 1 (рис. 6). Черная стрелка на рис. 8 (фрагмент 00 рис. 7) указывает положение выходного диффузора подводного коллектора. Между стрелкой и краем маски, закрывающей сушу, видна область распространения стока дренажного канала 1. Здесь, как и на рис. 4, выделяется тянущаяся вдоль берега аномальная область, ширина которой составляет ~(0.7-0.9) км, а ближайшая к берегу "кромка" удалена от него на расстояние ~1 км.

Выделение слабоконтрастных аномалий гидрооптических характеристик водной среды в прибрежной зоне, осуществляемое по сигналам "широкополосных" спектральных каналов изображения высокого пространственного разрешения, происходит в условиях сильной изменчивости средних уровней сигналов (даже на весьма ограниченных по площади участках изображений). Следует отметить, что это характерно для всех измерений, связанных с регистрацией излучения, проходящего через случайную взволнованную поверхность океана [10].

Применение процедур сглаживания сигналов и усреднения в некотором пространственном окне, требует поиска компромисса между минимальными размерами выделяемых геометрических признаков аномалий и размером окна усреднения. В процессе обработки размеры окон сглаживания изменялись в зависимости от конкретных условий в пределах от 12 м до 60 м (в плоскости поверхности океана).

Для иллюстрации тенденций мелкомасштабной изменчивости общих для сигналов (R, G, B каналы), в исследуемой прибрежной зоне, на рис. 9 (*a-e*) сопоставлены результаты обработки фрагмента 00 (рис. 7) в районе Вайанае и равного ему по размеру укороченного фрагмента в районе бухты Каилуа (рис. 3а). Здесь представлены цветокодированные изображения исходных сигналов в R (рис. 9а, з), G (рис. 9б, д) и B (рис. 9в, е) каналах после сглаживания в скользящем окне 15×15 пикселей (60×60 м). Фрагменты, представленные на рис. 9а-в относятся к району коллектора Вайанае, а на рис. 9г-е – к устью канала Кавануи в бухте Каилуа. На всех представленных изображениях выявляется сильная мелкомасштабная (как пространственная, так и амплитудная) изменчивость канальных сигналов в прибрежной зоне, которая ослабевает по мере удаления в открытый океан. При этом во всех каналах уменьшение

амплитуд сигналов происходит в направлении от берега в сторону открытого океана.

Особый интерес представляет рекреационная зона Вайкики в районе г. Гонолулу. На рис. 10 представлены: фрагмент (рис. 10а) исходного изображения от 13 сентября 2003 г., охватывающий южную часть побережья в районе канала Ала Ваи, и результаты (рис. 10б-г) обработки этого фрагмента размером 1220×1228 пикселей (4.9×4.9 км²). В нем дополнительно выделен подфрагмент (рис. 10а/) размером 700×400 пикселей (2.8×1.6 км²). Цифрами на приведенных изображениях обозначены места выхода береговых стоков: №1 - устье канала Ала Ваи; № 2-7 - менее значимые по объему сброса источники.

Результаты обработки на рис. 10б-г представлены в виде цветокодированных изображений распределения значений индексов B/G (рис. 10б), B/R (рис. 10в) и G/R (рис. 10г). Характер взаимного расположения аномалий, выделенных на рис. 10б-г, соответствует аналогичным данным, представленным ранее на рис. 4а-в и рис. 7а-в. Из рис. 10б видно, что на расстоянии около 600-800 м от берега также существует (сравнить с рис. 3 и рис. 7) протяженная зона повышенных значений B/G , максимальный размер которой в поперечнике составляет около 1.6 км. Существование этой зоны может свидетельствовать о повышенной концентрации фитопланктона, благодаря следующим факторам:

- выносу глубинных вод у кромки прибрежного шельфа, обогащенных биогенными элементами, способствующими развитию фитопланктона;

- пассатному течению, под действием которого за выступающими участками побережья возникают "кольцевые" течения [14] и "застойные" зоны, где локализуются продукты береговых стоков и скопления фитопланктона (как это следует из рис. 10в и, например, рис. 3а).

В пользу сделанных предположений свидетельствует область повышенных значений индексов B/R (рис. 10в) за выступом береговой кромки в нижней, правой части фрагмента, где нет значительных источников сброса, сравнимых по объему стока с каналом Ала Ваи.

Сброс самого канала выявляется на подфрагменте (район горы Diamond Head) (рис. 10а1) в виде вытянутой в сторону открытого океана аномальной области. На изображении область сброса простирается от устья канала (т. 1) в левый нижний угол подфрагмента. Маскированный участок облака и его тени накладывается на место максимального проявления стока и не позволяет проследить его развитие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе изложена первая часть результатов исследований, проведенных при обработке и анализе изображений спутника "Ikonos", полученных в прибрежных акваториях, подверженных антропогенным влияниям.

Показано, что возможности многоспектральной аппаратуры высокого пространственного разрешения и примененная методика обработки позволяют исследовать мелкомасштабную изменчивость океана на значительных площадях в пределах слоя формирования яркости морской поверхности. Тем самым обеспечивается возможность выделения подповерхностных эффектов, связанных со стоками дренажных каналов, в многоспектральных изображениях при достаточно широких спектральных полосах. При этом на исходных изображениях до проведения обработки аномалии, связанные со стоками дренажных каналов, обычно не наблюдаются.

Изложенные подходы к обработке многоспектральных космических изображений высокого пространственного разрешения могут быть использованы при организации мониторинга антропогенных воздействий на прибрежные акватории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии / Новые идеи в океанологии. Т. 1. Физика. Химия. Биология. М.: Наука, 2004. С. 55-117.
2. Bidigare R.R., Trees C.C. HPLC phytoplankton pigments: Sampling, laboratory methods and quality assurance procedures. In: Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation: Version 2.0 // Eds Mueller J., Fargion G. NASA Technical Memorandum, 2000.
3. Paiva A.M., Hargrrov J.T., Chassignet E.P., Bleck R. // J. Mar. Syst. 1999. V. 21. P. 307-320.
4. MODIS. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. NASA's Earth Observing System. Goddard Space Flight Center. Greenbelt. Maryland, 20771. USA, NP-2002-1-423GSPC, 2002. 21 p.
5. Копелевич О.В., Буренков В.И., Гольдин Ю.А., Карабашев Г.С. Оптические методы в океанологии и морской геологии // Новые идеи в океанологии. Т. 1. Физика. Химия. Биология. М.: Наука. 2004. С. 118-142.
6. Еремеев В.А., Мордвинцев И.Н., Платонов Н.Г. Современные гиперспектральные сенсоры и методы обработки гиперспектральных данных // Исслед. Земли из космоса. 2003 г. № 6. С. 80-90.
7. Gregg W.W., Conkright M.E., O'Reilly J.E. et al. NOAA-NASA Coastal Zone Color Scanner Reanalysis Effort // Appl. Opt. 2002. V. 41. № 9. P. 1615-1628.
8. Wang M., Isaacman A., Franz B.A., McClain C.R. Ocean-color optical property data derived from the Japanese Ocean Color and Temperature Scanner and the French Polarization and Directionality of the Earth's Re-

- flectances: a comparison study" // *Appl. Opt.* V. 41. № 6. P. 974-990.
9. *Chang G., Mahoney K., Briggs-Whitmore A. et al. The New Age of Hyperspectral Oceanography" // Oceanogr. June, 2004. № 17(2), P. 23*
10. Оптика океана. Т.1. Физическая оптика океана / Под ред. А.С. Мони́на. М.:Наука, 1983. 372 с.
11. *Бондур В.Г., Зубков Е.В. Лидарные методы дистанционного зондирования загрязненного верхнего слоя океана // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т.14. №2. С.142-155.*
12. *Ерлов Н.Г. Оптика моря. Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1980 г. 242 с.*
13. *Пелевин В.Н., Рутковская В.А. Об оптической классификации океанских вод по спектральному ослаблению солнечного излучения // Океанология. 1977. Т. 17. Вып.1. 1997. С.50.*
14. *Atlas of Hawaii/ Ed. S. Juvik, J. Juvik. Honolulu: Univ. Hawaii Press, 1998. 333 p.*

Showing up the Small-Scale Ocean Upper Layer Optical Inhomogeneities by the Multispectral Space Images with the High Surface Resolution. Part 1. The Canals and Channels Drainage Effects at the Coastal Zone

V. G. Bondur, E. V. Zubkov

Scientific Center of Aerospace Monitoring "AEROCOSMOS". Moscow

The results of processing ocean multispectral images for the purpose showing-up coastal zone optical inhomogeneities are presented. Space images were obtained by "Ikonos" in period 2000-2003 years. The satellite apparatus provides 4 m surface resolution at more than 10 km scan and amplitude resolution 11 bit/pixel in each of channels: *B* (450-520) nm, *G* (520-600) nm, *R* (630-690) nm, and *NIR* (Near Infra Red) (760-900) nm. We applied the image processing method based on using the comparative changeability characteristics of moderate spectral width (60-80 nm) channel signals. This method permits to mark out the low-contrast small-scale (from some tens meters to some km) hydrooptical characteristics inhomogeneities caused by canals and channels drainage effects at coastal zone of Oahu (Hawaii, USA).